

محاسبه جابه‌جایی زمین ناشی از زمین‌لرزه با استفاده از تداخل‌سنجی راداری، ماهواره Sentinel 1 (مطالعه موردی: شهر ترکمانچای)

علی پورمحمد^۱، مریم بیاتی خطیبی^۲✉

^۱ دانش آموخته سنجش از دور، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز؛ pormohamadiali7@gmail.com

^۲ استاد ژئومورفولوژی گروه سنجش از دور، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز؛ m_bayati@tabrizu.ac.ir

نوع مقاله: علمی پژوهشی

صفحه ۵۹ تا ۷۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۳۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۹

چکیده

زمین‌لرزه فاجعه طبیعی و کشنده است که موجب مرگ و زخمی شدن بسیاری از افراد ۱۴۰۴/۰۳/۹ و امواج سونامی می‌شود. اگرچه یکی از رایج‌ترین پدیده‌های طبیعی است اما توسط بسیاری از مردم به عنوان ترسناک‌ترین و خطرناک‌ترین مخاطره در نظر گرفته می‌شود. در حال حاضر با پیشرفت علم سنجش از دور، تداخل‌سنجی راداری به عنوان روشی کارآمد و نسبتاً دقیق در اندازه‌گیری جابه‌جایی سطح زمین است که می‌تواند جابجایی‌های بسیار جزئی را هم سنجش نماید. منطقه شمال غرب کشور از محدوده‌های بسیار حساس از نظر فعالیت‌های تکتونیکی و زمین‌لرزه‌ها است. در این مقاله شهر ترکمانچای و وقوع زمین‌لرزه ۱۷ آبان سال ۱۳۹۸ برای بررسی در نظر گرفته شده است. در واقع هدف از این تحقیق برآورد میزان بالآمدگی و فروافتادگی سطح زمین ناشی از زمین‌لرزه در شهر ترکمانچای است. به منظور برآورد میزان جابجایی ناشی از زمین‌لرزه در شهر مذکور، از روش تداخل‌سنجی راداری (InSAR) و از داده‌های تصاویر پایین رو و برای پردازش داده‌ها از نرم‌افزار SNAP استفاده شده است. با عنایت به این که، فن تداخل‌سنجی راداری اجازه می‌دهد جابه‌جایی‌های عمودی سطح زمین در حد میلی‌متر تشخیص داده شود. در این راستا تصاویر ماقبل و ما بعد زمین‌لرزه، از داده‌های سنتینل-۱ مرتبط با منطقه انتخاب و به کار گرفته شده‌اند. و خروجی‌های مورد نظر به صورت اشکال و نمودار ارائه شده است. نتایج تحقیق نشان داد که میزان جابه‌جایی سطح زمین ۷/۳- سانتی‌متر در محدوده شهر ترکمانچای بوده است. که در ابعاد محیطی و تغییر در تعادل منطقه ای رقم قابل توجهی است.

واژگان کلیدی: Sentinel 1A، InSAR، Displacement، تداخل‌سنجی، زمین‌لرزه، ترکمانچای

^۱ دانش آموخته سنجش از دور، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز pormohamadiali7@gmail.com

^۲ ✉ استاد ژئومورفولوژی گروه سنجش از دور، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز (نویسنده مسئول) m_bayati@tabrizu.ac.ir

مقدمه

قرارگرفتن فلات ایران بر روی کمربند لرزه‌خیز کره زمین و وجود گسل‌های متعدد، وقوع زمین‌لرزه‌های متعدد در ایران را به امری طبیعی تبدیل کرده است. ایران ششمین کشور لرزه‌خیز دنیاست. به علت فعالیت‌های تکتونیکی مستمر در فلات ایران در هر لحظه می‌توان شاهد وقوع لرزه‌های متعدد بود که اغلب این زمین‌لرزه‌ها به علت کم ریشتری قابل احساس نیستند. جابجایی‌های عمودی زمین به هر علتی بحران‌های محیطی متعددی را در پی خواهد داشت که در بیشتر موارد در کوتاه مدت غیر قابل برگشت است. با توجه به گزارشات رسیده این جابجایی‌ها در دو دهه اخیر در بیشتر قسمت‌های ایران رخ داده و به یکی از مهمترین عوامل تهدید کننده تبدیل شده است. گاه این جابجایی‌ها در اثر حرکات تکتونیکی و در موارد دیگر، به علت پایین رفتن سطح آب‌های زیرزمینی بوده است. منطقه شمال غرب ایران از جمله حساس‌ترین محدوده‌های ایران از نظر فعالیت‌های تکتونیکی است که در اثر این فعالیت‌ها زمین‌لرزه‌های متعددی رخ می‌دهد. یکی از این زمین‌لرزه‌ها، وقوع زمین‌لرزه‌ای در ۱۷ آبان در منطقه ترکمنچای، واقع در شمال غرب ایران است، که به لحاظ دارا بودن نرخ بالای دگرشکلی (مسون و همکاران، ۲۰۰۷) و سابقه لرزه‌خیزی تاریخی (امبرسیز و ملویل ۱۹۸۲)، قابل ملاحظه بوده و با توجه به شواهد متعدد این محدوده یکی از فعال‌ترین مناطق ایران محسوب می‌گردد.

برای مطالعه جابجایی‌های سطح زمین روش‌های مختلفی از طرف محققین به کارگرفته می‌شود، قبل از استفاده روش‌های سنجش از دور، مطالعات فرونشست به مشاهدات میدانی و همچنین مدل‌سازی عددی محدود می‌شدند، اما ویژگی‌های داده‌های ماهواره‌ای، باعث شده تا پژوهشگران از آن‌ها برای اندازه‌گیری نشست زمین استفاده کنند (خرمی، ۱۳۹۶). تصاویر راداری قادر به اندازه‌گیری جابه‌جایی سطح زمین در قدرت تفکیک مکانی و زمانی بالا می‌باشد که می‌تواند به صورت یکی از بهترین روش‌های سنجش از دور برای

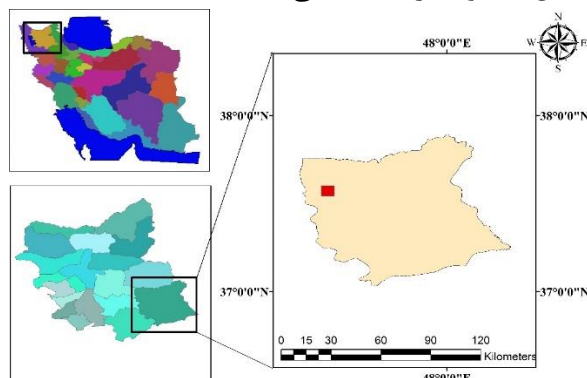
محاسبه تغییرات محسوب شود (جانباز فوتمی و همکاران، ۱۳۹۹). پدیده جابجایی عمودی زمین به دلیل عوامل گوناگونی از جمله عوامل طبیعی، مانند زمین‌لرزه، آتشفشان، فعالیت گسلی، فرونشست ناشی از بالا آمدن سطح دریا، انحلال در سنگ، اکسایش، فشردگی رسوبات آلی، توسعه چاله در زمین‌های کارستی و یا ناشی از فعالیت‌های انسانی (ژی یوان، ۲۰۱۶) شامل برداشت بی‌رویه سیالات از زمین نظیر آب، نفت و گاز (اچ. گو و دیگران، ۲۰۱۵)، معدن‌کاری مثل استخراج زغال سنگ و طلا، گوگرد و مواد جامد دیگر، همچنین ساخت و سازهای زیرزمینی و افزایش بار بر اثر ساخت زیاد رخ می‌دهد. براساس برآورد کارشناسان بیش از ۱۵۰ شهر از شهرهای بزرگ دنیا با گستره‌ای از کشورهای توسعه یافته تا در حال توسعه، در معرض وقوع این پدیده هستند (شریفی کیا و همکاران ۱۳۹۰، یمانی و همکاران ۱۳۸۸). در محور بررسی جابجایی سطح زمین مطالعات زیادی در سطح جهان و ایران انجام شده است، که می‌توان از آن به تحقیقات مدیرزاده و اصغری سراسکانرود (۱۴۰۱) اشاره کرد که میزان جابجایی زمین بعد از زمین‌لرزه تیرماه ۱۳۹۹ شهر قطور را با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری، حدود ۸ میلی‌متر در ماه، در راستای خط دید ماهواره برآورد کردند. کل‌میشی و همکاران (۱۴۰۱) میزان جابجایی زمین (فرونشست) بعد از زمین‌لرزه شهر دهلران ۲۸ اسفند ۱۳۹۸ را با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی را به میزان ۷ سانتی‌متر بر آورد کردند. ملکی و همکاران (۱۴۰۲) میزان این جابجایی را بعد از زمین‌لرزه ۲۱ آبان ۱۳۹۶ کرمانشاه با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی به میزان ۳۳/۱۲۶۵ در قسمت‌های شرق، جنوب و غرب ثلاث باباجانی و قسمت‌های غربی و جنوبی شهرستان و همچنین به میزان ۱۶/۳۰۴ سانتی‌متر به صورت نوار باریکی در شمال و جنوب شهرستان سرپل ذهاب برآورد کردند. نصیری و همکاران برای زمین‌لرزه ۲۹ بهمن ۱۳۹۹ منطقه سی‌سخت، جابجایی زمین را در سطح دشت مورد بررسی قرار دادند و نتایج نشان داد حدود ۹ سانتی‌متر نشست رخ داده که بیشتر بخش مرکزی

شهرستان را در بر گرفته است. نظم‌فر و شیرزاد (۱۴۰۱) با استفاده از تصاویر سنتینل ۱ و روش تداخل‌سنجی راداری جابجایی زمین بر اثر برداشت آب‌های زیرزمینی در بازه زمانی ۲۰۱۹/۰۸ تا ۲۰۲۰/۰۴ در حدود ۹/۳۵ سانتی‌متر محاسبه کردند؛ از نتایج حاصل مشخص شد جهت گسترش نشست از جنوب‌شرق به سمت جنوب‌غرب دشت می‌باشد. در تحقیق روزبان و همکاران (۱۳۹۵) از روش تداخل‌سنجی تفاضلی راداری DInSAR و داده‌های راداری سنجنده جدید سنتینل ۱ میزان جابجایی برای دشت رفسنجان و برای مدت یک‌سال به میزان حداکثر ۲۸ سانتی‌متر در سال نشان دادند و عامل اصلی جابجایی زمین در جهت عمودی برداشت بی‌رویه آب از سفره‌های آب زیرزمینی دانستند. زینالی و میرحیدری در تحقیق خود میزان جابجایی زمین ناشی از برداشت آب‌های زیرزمینی در دشت مرند در طول ۳۴ سال به میزان ۱۶/۵ متر محاسبه و برآورد کردند. راسپینیا و همکاران (۲۰۱۴)، در دلتای شمال یونان، پدیده جابجایی را با استفاده از مدل سازی ژئوتکنیک و همچنین تداخل‌سنجی بررسی کرده و برای بازه زمانی ۶ ساله، مقدار متوسط سالانه فرونشست را ۴/۵ سانتی‌متر بدست آوردند. کاپلی و همکاران (۲۰۲۲) نرخ جابجایی زمین در دهلی‌نو را تکنیک تداخل‌سنجی پراکنده میزان ۲۰ سانتی‌متر در سال برآورد کردند. شمشکی و همکاران در بررسی‌های ترازیابی و داده‌های ماهواره‌ای به شیوه InSAR نرخ جابجایی برای پهنه‌ای با مساحت بیش از ۴۰۰ کیلومتر در جنوب و جنوب غرب تهران را ۳ تا ۱۶ سانتی‌متر در سال برآورد کردند. راهنما و میراثی (۱۳۹۴) میزان جابجایی در روستای شول به ازای ۲۱ متر افت آب به طور متوسط ۱۶/۵ سانتی‌متر تعیین کردند که با فاصله گرفتن از روستا این میزان جابجایی به علت ضخامت آبرفت به حدود ۲۲ سانتی‌متر افزایش یافته است. روستایی و همکاران طبق پردازش تصاویر سنتینل-۱ بین سال‌های ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۰، نرخ جابه‌جایی و نشست زمین را برای دشت شبستر - صوفیان را به میزان ۴/۷

متر در منطقه محاسبه کردند. حداد و خراسانی (۱۳۹۷) میزان جابجایی برای دشت سمنان و تکنیک تداخل‌سنجی راداری در بازه زمانی ۱۳۸۲/۰۳/۲۶ تا ۱۳۸۳/۰۸/۲۳ حداکثر جابجایی را ۱۳۳ میلی‌متر در شهر سمنان و پیرامون آن و در تحقیق مذکور با هدف شناسایی عوامل موثر در جابجایی زمین در بخشی از دشت سمنان، نوسانات عمق سطح آب زیر زمینی به همراه ترسیم نمودار هیدروگراف از نتایج ۱۵ چاه مشاهده ای مورد بررسی قرار دادند که نشان دهنده افت ممتد سطح آب در طی دوره های آبی سال‌های ۱۳۸۲ تا ۱۳۸۸ بوده، طوری که نرخ افزایش ژرفای سطح آب زیرزمینی محدوده مطالعاتی برابر ۲۲ سانتی متر در سال است. با توجه به موارد مطالعاتی فوق، هدف از تحقیق حاضر، اندازه‌گیری میزان جابجایی زمین با استفاده تکنیک تداخل‌سنجی راداری و تصاویر سنتینل-۱ برای زمین لرزه ۱۷ آبان ۱۳۹۸ به بزرگی ۵/۹ طی بازه زمانی ۲۰۱۹/۱۱/۹ تا ۲۰۱۹/۱۱/۲۸ می‌باشد. کلودیا تکسیرا و همکاران (۲۰۲۴) با به کارگیری ۱۴۵ تصویر ماهواره سنتینل-۱ بین ژوئن ۲۰۱۹ تا آوریل ۲۰۲۴، با تکنیک رادار دیافراگم مصنوعی تداخل‌سنجی (QPS-InSAR)، برای Maceió برزیل حداکثر جابه‌جایی ۱۷۵۰- میلی‌متر را محاسبه کردند. آلبانو و همکاران (۲۰۲۴) با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری، میزان جابه‌جایی ۲۰۱ سانتی‌متر را برای زمین‌لرزه ۲۰ می ۲۰۱۲ ایتالیا محاسبه کردند. شنگ و همکاران (۲۰۲۳)، با استفاده از ۵۱ تصویر سنتینل-۱ که پکن را قبل و بعد از بیماری کوید-۱۹ پوشش میداد، به محاسبه جابه‌جایی زمین با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری پرداختند و نتایج نشان داد که میزان جابجایی از ۵۷- میلی‌متر در سال به ۴۳- میلی‌متر کاهش یافت و علت آن کاهش فعالیت‌های انسانی در طول پاندمیک بود.

با توجه به مطالب ارائه شده می‌توان نتیجه گرفت که مساله جابجایی‌های رخ داده در ایران و بخش‌های مختلف سرزمینی جدی بوده و قابل مطالعه مکرر در سال‌های پیش رو است. منطقه شمال غرب ایران نیز

مستعد شدن این محدوده برای تحریک پذیری بیشتر این محدوده برای جابجایی‌ها شده است.



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه (مربع قرمز موقعیت شهر ترکمانچای را نشان می‌دهد)

مواد و روش‌ها

برای انجام این تحقیق در ابتدا اطلاعات مربوط به موقعیت زمین‌لرزه اخذ شد و سپس دو تصویر راداری بعد و قبل از تاریخ رخداد زمین‌لرزه از سازمان فضایی اروپا (Sentinel-1)، گرفته شد. تصاویر تهیه شده دارای حداقل خط مبنا می‌باشد چون هر چه فاصله زمانی بین دو تصویر کمتر باشد، تغییرات جابه‌جایی سطح زمین را بهتر نمایش می‌دهد. اطلاعات مربوط به تصاویر در جدول (۱) ارائه شده است. تصویر قبل از زمین‌لرزه و بعد زمین‌لرزه به ترتیب تصویر پایه و تصویر پیرو می‌نامند. همچنین پردازش‌ها از طریق نرم افزار SNAP انجام شد که مراحل انجام این پژوهش در شکل ۲ ارائه شده است. با عنایت به اینکه سنجنده‌های راداری روش‌های جدیدی برای اندازه‌گیری تغییرات سطح زمین با دقت چند میلی‌متر فراهم کرده‌اند (تونگ و همکاران، ۲۰۲۰)، سعی شد در این بررسی، با استفاده از سنجنده راداری Sentinel-1 و بکارگیری تکنیک InSAR اندازه‌گیری تغییرات شکل زمین در مقیاس میلی‌تر در طول زمان محاسبه شود. در مقاله حاضر از روش تداخل‌سنجی راداری برای تعیین تغییر شکل که ابزاری مناسب برای نظارت برای تغییرات توپوگرافی در مناطق بزرگ بوده و قادر به محاسبه تغییرات در مدت زمان طولانی با دقت بالا از چند میلی‌متر تا سانتی‌متر

مستثنی از قاعده نیست. این محدوده هم با جابجایی‌های ناشی از تکتونیک و هم با مساله فرونشست‌های ناشی از استحصال بیش از حد آب‌های زیرزمینی روبرو است. محدوده ترکمنچای از محدوده‌های در معرض جابجایی‌های عمودی است که در این مقاله به آن پرداخت می‌شود.

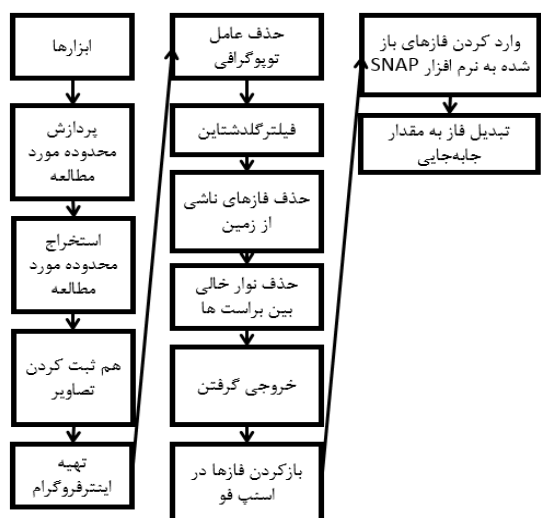
منطقه مورد مطالعه

شهر ترکمانچای یکی از شهرهای استان آذربایجان شرقی و از توابع شهرستان میانه می‌باشد؛ و در مختصات $37^{\circ}58'0''$ درجه شمالی و $47^{\circ}39'2''$ درجه شرقی قرار گرفته است. برپایه سرشماری عمومی نفوس و مسکن در سال ۱۳۹۵، جمعیت شهرستان ترکمانچای برابر با ۲۱/۳۸۷ نفر بوده است. شهرستان ترکمانچای از شمال با شهرستان هشترود، از جنوب‌غربی با شهرستان سراب، از شرق تا جنوب با شهرستان میانه و از شمال‌غربی با شهرستان بستان آباد همسایه است؛ در شکل ۱ موقعیت منطقه مورد مطالعه نشان داده شده است.

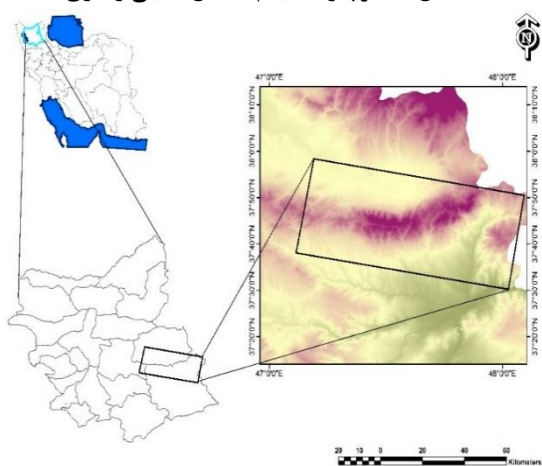
تشکیلات زمین‌شناسی محدوده ترکمانچای محصول دگرسانی و هوازدگی واحدهای توفی ائوسن بالایی می‌باشد. مطالعات کانی‌شناسی نشان می‌دهند که نمونه‌های بنتونیتی در این ذخیره شامل کانی‌های مونتوریلونیت، کائولینیت و آل بیت هستند که در مقادیر کمتر توسط کانی‌هایی نظیر، سانیدین کریستوبالیت، کلسیت، کوارتز، موسکویت، و نانترونیت همراهی می‌شوند. محاسبات تغییرات عناصر شاخص نشان می‌دهند که فرایند تبدیل توفهای ائوسن بالایی به بنتونیت در این منطقه با تهی شدگی عناصری نظیر Zn, Si, Al, Na, K, Ba, Cu, Ga غنی شدگی عناصری نظیر Mg, Ca و شستشو- تثبیت عناصری چون V, Y و Zr همراه شده است. این در حالی است که سایر عناصر اصلی، فرعی، و جزئی متحمل کمترین جابجایی و تحرک در طی تکوین این ذخیره شده‌اند. این تحقیقات حاکی از این است که تحولات زمین‌شناسی هم باعث

جدول ۱. مشخصات تصاویر راداری مورد استفاده

شماره	تاریخ تصویر	فرمت تصویر	حالت تصویر برداری	گذر تصویربرداری	پلاریزیشن
۱	۲۰۱۹/۱۰/۲۸	SLC	IW	Descending	VV
۲	۲۰۱۹/۱۱/۰۹	SLC	IW	Descending	VV



شکل ۲. فلوچارت انجام تداخل‌سنجی راداری



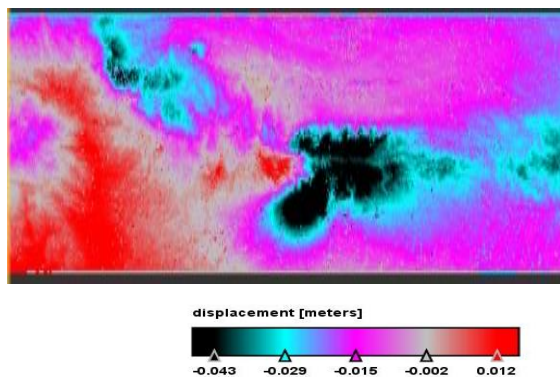
شکل ۳. موقعیت منطقه مورد مطالعه جهت استخراج تصاویر راداری

$$\text{رابطه (۱)} \quad \text{Vert_Displ} = \frac{\phi_{unw} \cdot \lambda}{-4\pi \cdot \cos \theta_{inc}}$$

سیستم‌های راداری خالی از نویز نیستند. هرچه مقدار نویز به سیگنال بیشتر برسد، تصویر بی‌کیفیت‌تر

است، استفاده شد. در این منطقه در هر کیلومتر مربع از تصاویر Sentinel در باند C برای تعیین تغییر شکل و جابه‌جایی انباشته شده در یک بازه زمانی در سال ۲۰۱۹ با استفاده از نرم افزار SNAP (که یک نرم افزار قدرتمند بوده و در طیف گسترده‌ای از دریچه مصنوعی (SAR) و تکنیک‌های پردازش InSAR چند محتوا را پیاده‌سازی می‌کند، جاکوم و همکاران، ۲۰۲۰) استفاده شد. در شکل ۳ موقعیت محل استخراج تصاویر نشان داده شده است.

اولین قدم از مراحل پردازشی تداخل‌سنجی، انتخاب تصاویر مناسب است که مجموعه تصاویر استفاده شده در تحقیق حاضر در جدول (۱) شرح داده شده است. سپس دو تصویر راداری (SLC)، وارد نرم‌افزار SNAP شد. در نرم‌افزار SNAP که برای کار با داده‌های سنتینل طراحی شده است، محدوده مورد نظر از تصاویر اصلی به خاطر تسریع در روند پردازش، تصاویر جدا و تصاویر با هم Back Geocoding شدند. در ادامه به منظور استفاده از یک آزیموت و برد ثابت برای کل تصاویر از دستور مربوطه Enhanced Spectral Diversity استفاده شد. بعد از انجام تصحیحات با استفاده از اختلاف‌فازها با اینترفروگرام منطقه به دست آمد. در مرحله بعد فضاهای خالی بین آن‌ها (تصاویر سنتینل ۱ از 3 IW تشکیل شده است که هر IW دارای ۹ براست بوده و بین براست‌ها، فضای خالی وجود دارد، Tops) Deburst و سپس عامل توپوگرافی حذف شده است (Topographic phase Removal) و بعداً به منظور افزایش کیفیت تصویر، اینترفروگرام تهیه شده است (Golstein Phase Filtering). پس از انجام مراحل تداخل‌سنجی برای تبدیل اختلاف‌فازها به جابه‌جایی قائم از یک نرم‌افزار واسطه Snaphu Export جهت بازکردن فازها استفاده شده است. بعد از بازکردن فازها (unwrapping) در Snaphu، در مرحله بعدی فازهای بازشده وارد نرم‌افزار شده و با استفاده از رابطه (۱) اختلاف فاز به جابه‌جایی قائم در سیستم متریک تبدیل شدند.



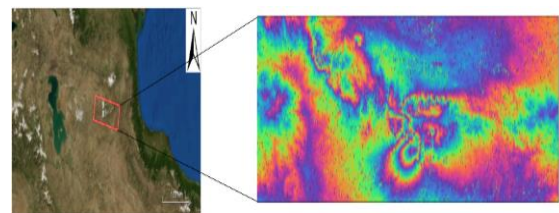
شکل ۶. تصویر جابه‌جایی سطح زمین

نتایج و بحث

۱- بررسی لرزه‌خیزی منطقه:

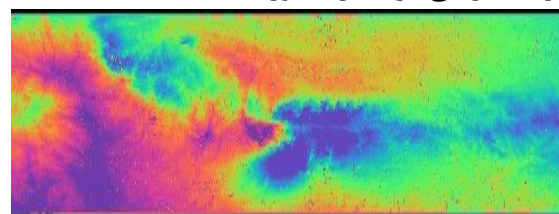
زمین‌لرزه‌ای به بزرگی ۵.۹ ریشتر در ساعت ۲ و ۱۷ دقیقه و ۳ ثانیه بامداد روز جمعه ۱۷ آبان ۱۳۹۸ شهر ترکمانچای را لرزاند که پس لرزه‌های آن روزها ادامه داشت، این زمین‌لرزه دگر شکلی‌های زیادی در پی داشت. بررسی موقعیت زمین‌لرزه‌های رخ داده در منطقه شمال غرب بیانگر این است که این منطقه در طول تاریخ بارها زمین لرزه‌های تاریخی بزرگ و مخربی را تجربه کرده است. تمرکز زمین‌لرزه‌های تاریخی در امتداد گسلی که از شمال کلان شهر تبریز عبور می‌کند، گویای جنبایی چشمگیر و قابل توجه این گسل در طول تاریخ می‌باشد. زمین‌لرزه اخیر ترکمانچای در منتهی شرقی این گسل واقع می‌شود. برخلاف لرزه‌خیزی تاریخی که فراوانی قابل توجهی در منطقه دارد، لرزه‌خیزی دستگاهی صدسال اخیر چندان بارز نمی‌باشد. در واقع، علی‌رغم نرخ بالای تغییر شکل پوسته بر پایه اندازه‌گیری‌های GPS، لرزه‌خیزی قابل انتظاری که با رخداد زمین‌لرزه‌های بزرگ همراه باشد به چشم نمی‌خورد. نگاهی به نقشه لرزه‌خیزی دستگاهی ۱۹۲۰ تا ۲۰۱۹ میلادی به خوبی حکایت از نرخ پایین لرزه‌خیزی و انرژی کم لرزه‌ای آزاد شده در طی صد سال اخیر دارد. این مسئله به خوبی دلالت بر چیرگی نرخ تغییر شکل حاصل از اندازه‌گیری‌های ژئودتیک نسبت به تغییر شکل لرزه‌ای همراه با رخداد زمین لرزه‌های بزرگ دارد. بررسی زمین‌لرزه دستگاهی با بزرگای بالای ۷ در راستای گسل شمال تبریز و

می‌شود. اعمال فیلتر برای کاهش نویزها امری ضروری است. فیلتر Goldstein یا گلدشتاین جزوه فیلترهای حذف نویز است و هم برای نمایش و تفسیر بهتر تصویر و برای اجرای مراحل بعدی امری ضروری تلقی می‌شود. البته فیلترهای زیادی جهت حذف نویز وجود دارد ولی به دلایلی ترجیح داده شده است که در این پژوهش از این فیلتر استفاده شود. این فیلتر باعث کاهش نویزهای اختلاف فاز روی تصویر تداخل‌نما می‌شود؛ خروجی اعمال فیلتر گلدشتاین در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴. تداخل‌نما پس از اجرای فیلتر گلدشتاین

در بررسی جابجایی‌های سطح زمین با استفاده از ابزارهای سنجش از دور، از اساسی‌ترین و مهم‌ترین مراحل، مرحله Unwrapping است؛ که در طی این فرایند ارزش پیکسل‌های تصویر Interferogram یا تداخل‌نما از حالت گسسته به حالت پیوسته تبدیل می‌شوند. برای دو نقطه در یک حلقه رنگی می‌توان اختلاف فاز و در نتیجه جابجایی را به راحتی حساب کرد، اما برای دو نقطه از دو حلقه رنگی متفاوت باید تعداد حلقه‌های رنگی وسطی را شمرد و محاسبه کرد. به عملی که این محدودیت را با اضافه نمودن مقادیر صحیح اختلاف فاز به هر پیکسل رفع می‌کند، بازیابی یا Phase Unwrapping می‌گویند. نتیجه اعمال مرحله بازیابی در شکل ۵ آورده شده است.

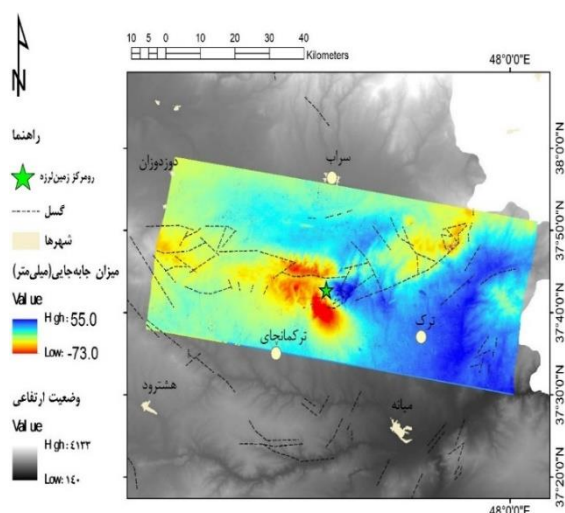


شکل ۵. تداخل‌نما با اعمال مرحله فاز بازیابی شده

با توجه به مراحل ذکر شده و با انجام محاسباتی نسبتاً ساده بر روی تصویر تداخل‌نما، تصویر جابه‌جایی به دست آمد که در شکل ۶ نشان داده شده است.

که منجر به پایین آمدن کیفیت تداخل‌نگاشت شود، لازم است تا با اجرای فیلترهای تطبیقی اثر این نویزها از روی تداخل‌نگاشت حذف شود. همچنین با استفاده از فیلتر تطبیقی گلدشتاین، نویزهای تداخل‌نگاشت کاهش یافت. پس از انجام پیش‌پردازش‌ها، نقشه اینترفروگرام منطقه تهیه شد؛ در شکل ۸ نقشه اینترفروگرام آورده شده است.

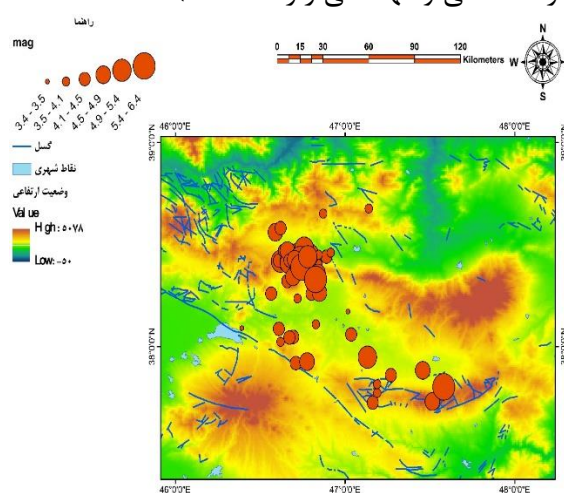
پس از تهیه نقشه اینترفروگرام، در مرحله بعدی از یک نرم افزار واسطه با نام snaphu جهت بازکردن فازها استفاده شده و فازهای باز شده وارد نرم‌افزار شده و با استفاده از رابطه ۱، اختلاف فاز به جابه‌جایی قائم تبدیل شده است و نقشه نهایی میزان جابه‌جایی قائم تهیه شد که در شکل ۹ نشان داده شده است.



شکل ۸. تصویر اینترفروگرام (تداخل‌سنجی) منطقه

بر مبنای نقشه نهایی حاصل شده، محدوده مطالعاتی بین ۵۵ تا ۷۳ میلی‌متر جابه‌جایی داشته است. در واقع این محدوده، در اثر زمین‌لرزه، ۷۳- میلی‌متر فرونشست و ۵۵ میلی‌متر نیز بالاآمدگی داشته است. ارزیابی نقشه جابه‌جایی منطقه بیانگر این است که بیشترین میزان جابه‌جایی در حاشیه رو به مرکز زمین‌لرزه صورت گرفته است. و در یک روند کلی مناطق غربی محدوده با فرونشست مواجه شده‌اند که روند میزان فرونشست به سمت مناطق شرقی کاهش می‌یابد.

منطقه مه‌لرزه‌ای زمین‌لرزه ۱۷ آبان ترکمانچای در طی صد سال اخیر روی نداده است. زمین‌لرزه دوگانه ۲۱ مرداد ۱۳۹۱ اهر-وررزقان با بزرگای ۶/۳ و ۶/۴ محدود می‌شود. به جز دو مورد فوق، هیچ زمین‌لرزه دیگری با بزرگای بالای ۶ در منطقه مشاهده نمی‌شود. در مقایسه با نرخ بالای جابه‌جایی راست‌گرد در راستای گسل شمال تبریز و سابقه رخداد زمین‌لرزه‌های متعدد فراوان با بزرگای بالای ۷، رخداد کم زمین‌لرزه‌های متوسط تا بزرگ به خوبی بر کم بودن نرخ آزاد شدن انرژی منطقه به صورت لرزه‌ای دلالت دارد. (پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، ۱۳۹۸).



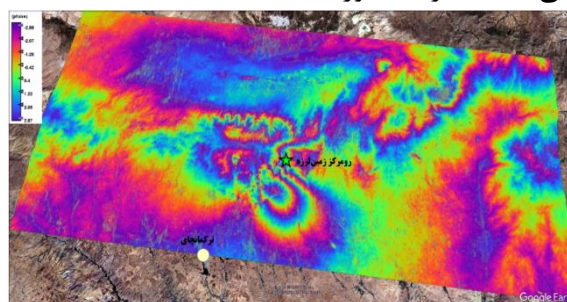
شکل ۷. نقشه لرزه‌خیزی منطقه از سال ۲۰۱۰ تا دسامبر ۲۰۱۹ ($x > 3.4$)

۲- اندازه‌گیری جابه‌جایی در اثر زمین‌لرزه:

در این مطالعه با توجه به نتیجه حاصله از بررسی خط مبنای زمانی و مکانی برای تصاویر سنتینل ۱ تعداد دو تصویر مربوط به تاریخ ۲۰۱۹/۱۱/۰۹ و ۲۰۱۹/۱۰/۲۸ (نزدیک‌ترین تصاویر مربوط به قبل و بعد از زمین‌لرزه)، بعد از کنترل پارامترهای حاصل از هم‌دوسی برای پردازش‌های بعدی مناسب تشخیص داده شده و مبنای تهیه نقشه جابه‌جایی سطح زمین در محدوده مورد مطالعه قرار گرفتند. نهایتاً میزان جابه‌جایی برای بازه زمانی مذکور بدست آمد. در این پژوهش، با استفاده از فیلتر تطبیقی گلدشتاین، نویزهای تداخل‌نگاشت کاهش یافت. پس از حذف اثر توپوگرافی، تداخل‌نگاشت در بازه زمانی مذکور تهیه شد. از آنجایی که تداخل‌نگاشت حاصله ممکن است حاوی نویزهایی باشد

۳- برآورد شدت در منطقه:

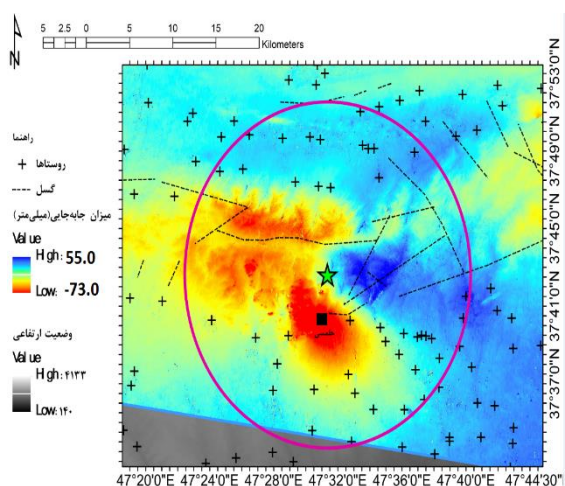
شدت زمین‌لرزه که معمولاً به صورت عدد یا به صورت کیفی بیان می‌شود، عبارت از قدرت و تاثیر زمین‌لرزه بر روی سطح زمین، انسان و سازه‌های ساخته شده بر روی آن می‌باشد و رابطه‌ای مستقیم با خرابی در همان محل دارد. با توجه به مکانی که زمین‌لرزه را احساس می‌نمایند، بر خلاف بزرگا که برای هر زمین‌لرزه یک عدد ثابت است، شدت‌های مختلفی برای یک زمین‌لرزه وجود دارد که با توجه به دوری یا نزدیکی از رو، مرکز زمین‌لرزه می‌تواند کم یا زیاد باشد. به عنوان مثال برای مناطق با شدت کم یا خیلی کم احتمال وقوع خسارت خیلی کم خواهد بود. با استفاده از داده‌های ثبت شده از این زمین‌لرزه توسط دستگاه‌های شبکه شتابنگاری، نقشه‌های پهنه‌بندی شدت، هم تهیه گردید که در شکل ۱۰ ادامه آمده است. (شبکه ملی شتابنگاری کشور)



شکل ۹. نقشه میزان جابه‌جایی قائم در اثر زمین‌لرزه

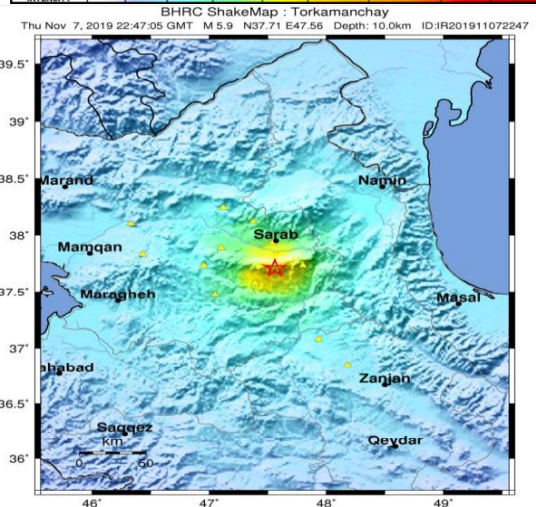
۴- تاثیر زمین‌لرزه بر مناطق روستایی:

در شعاع ۳۰ کیلومتری اطراف رو، مرکز زمین‌لرزه ۵/۹ ترکمانچای، حدود ۲۱۵ آبادی قرار دارد که جمعیتی در حدود ۷۸ هزار نفر را طبق آمار سال ۱۳۹۵ در خود جای داده است. ۱۲۵۰۰ واحد فاقد اسکلت و بنائی و ۹۵۰۰ واحد دارای اسکلت واحدهای مسکونی این تعداد از آبادی را تشکیل می‌دهند. بر اساس آمار منتشر شده در حوزه شهرستان میانه حدود ۴۵ آبادی و در حوزه شهرستان سراب حدود ۳۰ آبادی دارای درصدهای متفاوتی از تخریب واحدهای مسکونی شده اند. در شهرستان میانه روستاهای صومعه علیا، بالسین، ورنکش، ورزقان، حلمسی، دستجرد به ترتیب بین ۱۱۳ تا ۴۱۴ واحد تخریبی (غیر قابل تعمیر) داشته‌اند که آسیب‌دیده ترین مراکز روستایی حوزه میانه را تشکیل می‌دهند. در شهرستان سراب آسیب وارده کمتر از میانه بوده و روستای شالقون، دونیق، چیچکلو، اردها، گاودوش آباد و هروان به ترتیب بین ۵۰ تا ۸۶ واحد مسکونی تخریبی داشته‌اند. در شکل ۱۱ موقعیت روستاهای با فاصله ۱۳ کیلومتری (بیشترین درگیری با نوسانات زمین)، از رومرکز نشان داده شده است. موقعیت روستای حلمسی به گونه‌ای هست که با بیشترین میزان فرونشست مواجه شده است (۷۳ میلی‌متر فرونشست).



شکل ۱۱. موقعیت روستاها در منطقه (دایره تا شعاع ۱۳ کیلومتری ترسیم شده است)

PERCEIVED SHAKE EFFECTS	Not felt	Weak	Light	Moderate	Strong	Very strong	Severe	Violent	Extreme
PEAK VEL (cm/s)	<0.1	0.1-1.1	1.1-3.4	3.4-8.1	8.1-16	16-31	31-60	60-116	>116
INSTRUMENTAL INTENSITY	I	II-III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X



شکل ۱۰. نقشه لرزش زمین بر اساس پارامتر شدت

نتیجه گیری

زمین لرزه‌ها از علت اصلی جابجایی‌ها عمده در سطح زمین محسوب می‌شوند. بررسی تغییرات در سطح زمین که می‌تواند تغییرات عمده دیگری در عملکرد فرایندهای مختلف زمین پدید آورد، از اهمیت زیادی برخوردار است. کشور ایران که از نظر فعالیت‌های تکتونیکی از محدوده‌های بسیار فعال دنیا محسوب می‌شود که با هر فعالیتی که صورت می‌گیرد با توجه به ویژگی‌های تشکیلات سطحی زمین می‌تواند عملکردهای بسیار متفاوتی داشته باشد. در این تحقیق با توجه به موضوع و اهداف موردنظر، به برآورد جابه‌جایی سطح زمین ناشی از زمین‌لرزه ۱۷ آبان ۱۳۹۸ پرداخته شد. ابتدا با استفاده از دو تصویر سنجنده سنتینل ۱ (Descending) پردازش‌های موردنظر انجام شد و سپس با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری (InSAR)، میزان جابه‌جایی (فرونشست و بالآمدگی) صورت گرفته در منطقه با استفاده از نرم‌افزار SNAP محاسبه گردید. نتایج ارزیابی‌های صورت گرفته از میزان جابه‌جایی (فرونشست و بالآمدگی) بیانگر این هست که محدوده مطالعاتی بعد از رخداد زمین‌لرزه ۵/۹ ترکمانچای (بازه زمانی ۲۰۱۹/۱۰/۲۸ تا ۲۰۱۹/۱۱/۰۹) بین ۵۵ تا ۷۳ میلی‌متر جابه‌جایی داشته است. این جابجایی در جهات مختلف بوده که ۷۳ میلی‌متر پایین آمدگی و ۵۵ میلی‌متر بالآمدگی بوده است. در واقع تحلیل‌ها حاکی از این است که قسمت‌های غربی با فرونشست و قسمت شرقی منطقه نیز با بالآمدگی مواجه شده‌اند. بررسی موقعیت زمین‌لرزه‌های رخ داده در منطقه شمال‌غرب بیانگر این است که این منطقه در طول تاریخ بارها زمین لرزه‌های تاریخی بزرگ و مخربی را تجربه کرده است. تمرکز زمین‌لرزه‌های تاریخی در امتداد گسلی که از شمال کلان شهر تبریز عبور می‌کند، گویای جنبایی چشمگیر و قابل توجه این گسل در طول تاریخ می‌باشد. زمین‌لرزه‌های اخیر ترکمانچای در منتهی شرقی این گسل واقع می‌شود. علاوه بر نواحی سکونتگاهی، واحدهای ژئومورفولوژی نیز با جابه‌جایی همراه بوده‌اند که



الف



ب

شکل ۱۲. الف و ب) ریزش دیوارها و مصالح دارای اسکلت بتنی در روستای بالسین



الف



ب

شکل ۱۳. الف و ب) تخریب دیوار به دلیل ضعف مصالح و عدم اتصال مناسب در روستای ورنکش

منابع

- 1- Ambraseys, N.N., Melville, C.P., 1982. A history of Persian earthquakes. Cambridge Earth Science Series. Cambridge University Press, London. 212 pp.
- 2- Albano, M.; Chiaradonna, A.; Saroli, M.; Moro, M.; Pepe, A.; Solaro, G. InSAR Analysis of Post-Liquefaction Consolidation Subsidence after 2012 Emilia Earthquake Sequence (Italy). *Remote Sens.* **2024**, *16*, 2364. <https://doi.org/10.3390/rs16132364>
- 3- H.Guo, (2015), Groundwater-abstraction induced land subsidence and groundwater regulation in the North China Plain, p1ahs-372
- 4- Haddad, Abdul Hossein and Khorasani, Elham. (2018). The effect of underground water level changes on the subsidence of Semnan Plain. *Journal of Earth Sciences*, summer 2018, year 28, number 112, pp. 181-190. [In Persian]
- 5- Janbaz Futmi, Mahdia; Khalkhi, Majid; Abdo Kalachi, Abdul Nabi; Rural, foggy. (2019). Investigating land subsidence caused by changes in groundwater level using differential radar interferometry: a case study of Qazvin province. *Iran's water resources research*. Year 16, No. 3, pp. 147-133. [In Persian]
- 6- Kapil, M., Dheeraj, K., Daniele, P., Biswajeet, P. (2022). Estimation of ground subsidence of New Delhi, India using PSInSAR technique and Multi-sensor Radar data, *Advances in Space Research*, Volume 69, Issue 4, Pages 1863-1882, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.08.032>.
- 7- Khorrami, Mohammad. (2016). Estimation of Mashhad subsidence using radar interferometric technique and its evaluation according to geotechnical characteristics. Master's thesis in Civil Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, page 2. [In Persian]
- 8- Kalmishi, Zahra; Rusta, Iman and Zandi, Rahman. (1401). Extraction of ground surface displacement caused by earthquake using InSAR radar interferometric technique: case study: Dehleran city. *The 3rd National*

می‌تواند بسیار حائز اهمیت باشد. یکی از واحدهایی که میزان جابه‌جایی در آن دارای اهمیت بالایی است، واحد دشت‌های منطقه است. جابه‌جایی قائم رخ داده در دشت‌های منطقه می‌تواند در نوسان آب‌های زیرزمینی از جمله افت سطح آب‌های زیرزمینی منطقه مؤثر باشد. یکی دیگر از اثرات جابه‌جایی قائم، تاثیر بر دامنه‌ها است. با توجه به اینکه بخش عمده‌ای از منطقه را واحد کوهستان در برگرفته است، این جابه‌جایی می‌تواند سبب تشدید حرکات دامنه‌ای در سال‌های آینده شود. در واقع، زمین‌لرزه ترکمانچای از طریق جابه‌جایی قائم در نواحی کوهستانی و تاثیراتی که در استحکام دامنه‌ها و ایجاد گسیختگی در آنها داشته است، می‌تواند زمینه را برای وقوع حرکات دامنه‌ای در سال آینده را فراهم کند. از اثرات دیگر زمین‌لرزه ترکمانچای، تاثیر بر سازه‌ها و نواحی روستایی است؛ در شعاع ۳۰ کیلومتری اطراف رومرکز زمین‌لرزه ۵/۹ ترکمانچای، حدود ۲۱۵ آبادی قرار دارد که جمعیتی در حدود ۷۸ هزار نفر را طبق آمار سال ۱۳۹۵ در خود جای داده است. بر اساس آمار منتشر شده در حوزه شهرستان میانه حدود ۴۵ آبادی و در حوزه شهرستان سراب حدود ۳۰ آبادی دارای درصدهای متفاوتی از تخریب واحدهای مسکونی شده‌اند. در شهرستان میانه روستاهای صومعه علیا، بالسین، ورنکش، ورزقان، حلمسی، دستجرد به ترتیب بین ۱۱۳ تا ۴۱۴ واحد تخریبی (غیر قابل تعمیر) داشته‌اند که آسیب‌دیده‌ترین مراکز روستایی حوزه میانه را تشکیل می‌دهند. موقعیت روستای حلمسی به گونه‌ای هست که با بیشترین میزان پایین آمدگی مواجه شده است (۷۳ میلی‌متر فرونشست). سازه‌های انسانی از جمله استقرار تیرهای چراغ برق متاثر از جابجایی‌های سطح زمین است که در صورت انجام چنین جابجایی‌هایی خسارات سنگینی بر جای بگذارد. از نگاه آمایش سرزمین توجه مستمر به تغییرات در پهنه‌های زمینی به منظور مدیریت درست از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

- 15- Rostaei, Shahram; Rezaei Moghadam, Mohammad Hossein, Yarahamdi, Jamshid and Najaf Vand, Samira. (1401). Detection of subsidence for earth stability using radar interferometric method with permanent scattering (case study: Shabster-Sofian Plain). *Geography and Environmental Sustainability*, 12(3), 57-74. DOI: 10.22126/GES.2022.7538.2508. [In Persian]
- 16- Rozban, Ali, Esmaili, Ali and Motag, Mehdi. (2015). Investigating land subsidence using differential radar interferometry (DInSAR) and using SENTINEL sensor images. 2nd National Geospatial Information Technology Engineering Conference. Khwaja Nasiruddin Tusi University of Technology, Faculty of Mapping Engineering, January 29, 2015.[In Persian]
- 17- Raspinia, F., Loupasakis, C., Rozos., D., Adam, N., Moretti, S. (2014). Ground subsidence phenomena in the Delta municipality region (Northern Greece): geotechnical modeling and validation with Persistent Scatterer Interferometry, *ELSEVIER International Journal*, vol28, pp78-89, doi:10.1016/j.jag.2013.11.010
- 18- Sharifi Kia, Mohammad and Nikta, Maitham. (1390). Assessment and extraction of risks resulting from subsidence phenomenon in the residential areas of Greater Tehran, the first seminar on spatial analysis of environmental risks in the metropolis of Tehran, Tarbiat Moalem University. [In Persian]
- 19- Sheng, H.; Zhou, L.; Huang, C.; Ma, S.; Xian, L.; Chen, Y.; Yang, F. Surface Subsidence Characteristics and Causes in Beijing (China) before and after COVID-19 by Sentinel-1A TS-InSAR. *Remote Sens.* 2023, 15, 1199. <https://doi.org/10.3390/rs15051199>
- 20-Teixeira, A.C.; Bakon, M.; Perissin, D.; Sousa, J.J. InSAR Analysis of Partially Coherent Targets in a Subsidence Deformation: A Case Study of Maceió. *Remote Sens.* 2024, 16, 3806. <https://doi.org/10.3390/rs16203806>
- 21- Yamani, Mojtaba; Najafi, Ismail and Abedini, Mohammad Hossein. (1388). The Conference on Data Mining in Geosciences, Faculty of Geosciences Engineering. February 12, 1401. [In Persian]
- 9- Maleki, Rahman; Khavarian, Hassan and Asghari, Sayad. (1402). Measurement of ground subsidence using radar interferometric technique: case study: earthquake-affected areas of West Kermanshah. *Scientific Research Journal of Natural Environment Hazards*, Volume 12, Number 38, December 1402. [In Persian]
- 10- Madirzadeh, Reyhane; Asghari Saraskanroud, fisherman; Emami, Rashid and Rostami, Aref. (1401). Estimating the amount of ground displacement during the July 2019 earthquake in northwest Iran: Study area: Qatour city. *Geographical Information Scientific-Research Quarterly*, Volume 31, Number 122, Summer 1401. [In Persian]
- 11- Masson, F., Djamour, Y., Van Gorp, S., Chéry, J., Tatar, M., Tavakoli, F., Nankali, H., Vernant, P., 2007. Extension in NW Iran driven by Motion of the South Caspian Basin, *Earth Planet. Sc. Lett.* 252, 180–188.
- 12- Nasiri, Abuzar; Shafiei, Najmeh and Moradi, Shiva. (1401). Determining the displacement of the earth's surface using radar interferometry of satellite images of Sentinel-1: Study area: 3-shard Dana earthquake. The third national conference of Geological Remote Sensing Association. Chamran martyr of Ahwaz University.[In Persian]
- 13- Nazm Far, Hossein and Shirzad Gurjan, Munir. (1401). Land surface subsidence monitoring with radar interferometric fan: Study area: Mashgin plain. *Scientific Research Journal of Natural Environment Hazards*, 11th Volume, Number 31, Spring 1401. [In Persian]
- 14- Rahnema, Hossein and Erseghi, Sohrab; (2015). Analysis and evaluation of parameters affecting land subsidence. *Scientific-research journal of Imran Modares*, 16th volume, number 1, April 2015. . [In Persian]

Australia Using both L-Band and C-Band SAR
TimeSeries Analysis, Remote sensing magazine

23- Zinali, Ali and Mirheidari, Firouze.
Investigating land subsidence in the Marand
plain and ways to prevent it. [In Persian]

relationship between ground subsidence and
groundwater level drop in the Qara-Balagh
plain of Fars province, Scientific Research
Quarterly of Geography, Volume 1, pp. 9-27.
[In Persian]

22- Zheyuan Du, Linlin Ge, Xiaojing Li and
Alex Hay-Man Ng,(2016), Subsidence
Monitoring over the Southern Coalfield,

Calculation of ground displacement caused by earthquake using radar interferometry of Sentinel 1 satellite. (Case study: Turkmanchai city)

Abstract

Earthquakes represent a critical natural hazard, particularly in seismically active zones like Iran, which ranks as the world's sixth most earthquake-prone country. The active tectonic nature of Northwest Iran necessitates continuous monitoring of surface deformation. This research focuses on quantifying the ground displacement associated with the Magnitude 5.9 Turkmanchai earthquake that occurred on November 8, 2019 (Aban 17, 1398). The primary objective was to estimate the resulting co-seismic uplift and subsidence (vertical displacement) across the affected area. The study employed the advanced remote sensing technique of Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR), which is highly effective for detecting subtle surface changes down to the millimeter level. We utilized two Sentinel-1 descending pass, Single Look Complex (SLC) images acquired close to the event date (October 28, 2019, and November 9, 2019). Data processing was performed using the SNAP software environment. Key methodological steps included co-registering the images, removing the topographic phase, and applying the Goldstein Adaptive Filter to enhance interferogram quality by reducing noise. Crucially, the phase discontinuities were resolved through the Phase Unwrapping process using the Snaphu tool. The unwrapped phase difference was then converted into vertical displacement measurements. The results revealed a significant range of vertical displacement in the Line-Of-Sight (LOS) direction. The affected region experienced maximum deformation ranging from 55 mm of uplift to -73 mm of subsidence. The analysis showed that the highest magnitude of displacement was concentrated around the earthquake's epicenter. Spatially, a distinct pattern emerged, indicating widespread subsidence in the western sectors and uplift in the eastern sectors of the study area. The maximum recorded subsidence of 73 mm was specifically observed near Halmasi village. In conclusion, the documented surface displacement is a considerable figure in terms of environmental dimensions and regional equilibrium. This study reaffirms the indispensable role of the InSAR technique and Sentinel-1 data for rapid, precise monitoring and assessment of crustal deformation following seismic events in high-risk tectonic regions.

Keywords: Displacement, InSAR, Sentinel 1A, Interferometry, Earthquake, Turkmanchai.

