

## نوع مقاله: پژوهشی

## محاسبه مؤلفه‌های جابه‌جایی زمین‌لرزه ۲۹ بهمن ۱۳۹۹ سی سخت (M 5.4) با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری (InSAR)

## لطف اله عمادعلی (نویسنده مسئول)

استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه صنعتی  
خاتم‌الانبیاء بهبهان، بهبهان، ایران، emadali@bkatu.ac.ir

## مژگان مهرپاک

دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی، دانشگاه صنعتی  
خاتم‌الانبیاء بهبهان، بهبهان، ایران

## ساسان معتقد

استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه صنعتی  
خاتم‌الانبیاء بهبهان، بهبهان، ایران

## سید نصراله افتخاری

استادیار، دانشکده صنعت و معدن، دانشگاه یاسوج، چرام، ایران

## چکیده

یکی از مهم‌ترین اثرات زمین‌لرزه، ایجاد جابه‌جایی‌های افقی و قائم در سطح زمین است که در نتیجه آن، با توجه به شدت و منطقه وقوع زمین‌لرزه، خسارات جانی و مالی فراوانی ممکن است به وقوع بپیوندد. استفاده از روش سنجش از دور مبتنی بر به‌کارگیری تصاویر راداری ماهواره‌ای در دو دهه اخیر نقش بسیار مهمی در پیش‌بینی و اندازه‌گیری حرکات زمین داشته است. در این مقاله به منظور بررسی جابه‌جایی زمین ناشی از زمین‌لرزه ۲۹ بهمن ۱۳۹۹ شهرستان سی سخت، از تکنیک تداخل‌سنجی راداری (InSAR) استفاده شده است. بدین منظور با استفاده از چهار تصویر به‌دست آمده از سنجنده Sentinel-1A مربوط به قبل و بعد از زمین‌لرزه در دو حالت بالارونده و پایین‌رونده مدار ماهواره و پردازش این تصاویر در نرم‌افزار SNAP، نقشه جابه‌جایی زمین ناشی از وقوع این زمین‌لرزه تهیه شده است. نتایج نشان داد که بیشینه جابه‌جایی در شهر سی سخت حدود ۱۰ سانتی‌متر در راستای خط دید ماهواره است. با تجزیه جابه‌جایی به‌دست آمده در راستای خط دید به دو مؤلفه جابه‌جایی در راستای شرقی-غربی (مؤلفه  $x$ ) و بالا-پایین (مؤلفه  $z$ ) نقشه جابه‌جایی در دو راستای  $x$  و  $z$  تهیه شد که مقادیر آن به ترتیب برابر با ۱۶۱- و ۶ میلی‌متر است. این نقشه‌ها اطلاعات پایه مورد نیاز پردازش‌های مهندسی زمین‌لرزه را فراهم می‌آورد.

**واژگان کلیدی:** تداخل‌سنجی راداری، زمین‌لرزه، مؤلفه‌های جابه‌جایی، گسل دنا.

## ۱- مقدمه

زیاد در بیشتر مناطق کشور، به‌ویژه در مناطق هم‌جوار با رشته‌کوه‌های زاگرس و البرز- استفاده از تکنیک‌های نقشه‌برداری میدانی، به دلیل روش‌های زمان‌بر نقشه‌برداری و هزینه‌های بالای نیروی کار، برای اندازه‌گیری و پایش تغییر شکل، تقریباً غیرممکن است. تکنیک‌های سنجش‌از‌دور مدرن، نقش مهمی در ارزیابی مؤثر تغییر شکل ایفا می‌کنند (Emadali et al., 2017). به همین منظور، در سال‌های اخیر، از روش سنجش‌از‌دور و فناوری‌های مبتنی بر تصویربرداری راداری برای پایش مناطق وسیع در بازه‌های زمانی کوتاه استفاده‌های زیادی شده است. از جمله این فناوری، روش تداخل‌سنجی راداری با رادار روزنه ترکیبی است که به‌اختصار، روش InSAR گفته می‌شود. InSAR فناوری جدید پایش زمین است که قابلیت کار در تمام طول شبانه‌روز و تحت هر شرایط آب و هوایی را

زمین‌لرزه یکی از مخرب‌ترین بلایای طبیعی است. زمان دقیق وقوع زمین‌لرزه مشخص نیست و در عرض چند ثانیه، صدمات گسترده‌ی جانی و مالی وارد می‌کند. زمین‌لرزه می‌تواند اثرات ثانویه فاجعه‌باری به همراه داشته باشد (Shrestha, 2022). بیشتر اثرات مخرب در حوزه زمین‌شناسی ناشی از تغییر شکل سطح است؛ بنابراین، برای سنجش و ارزیابی اثرات زمین‌لرزه و نیز پیش‌بینی زمین‌لرزه‌های احتمالی، پایش مداوم تغییر شکل سطح زمین ضروری است. تداخل‌سنجی راداری با رادار روزنه ترکیبی<sup>۱</sup> روش نسبتاً جدیدی است که در سال‌های اخیر برای تهیه نقشه‌های تغییر شکل با دقت بالا در مناطق وسیع و همچنین پایش سری زمانی تغییر شکل، استفاده شده است (Berardino et al., 2002). با توجه به وسعت کشور ایران و قرار گرفتن بر روی کمربند اصلی زمین‌لرزه و نیز وجود گسل‌های متعدد با قدرت لرزه‌خیزی

اساس مشاهدات موجود، شبکه لرزه‌نگاری ایران عمق زمین لرزه را  $18 \pm 2$  کیلومتر برآورد نموده که با گزارش‌های سایر شبکه‌های لرزه‌نگاری جهانی از جمله USGS و GFZ مطابقت دارد. تداخل‌نگاشت‌های به‌دست‌آمده از پردازش تصاویر سنجنده‌های Sentinel-1A&B در دو حالت مداری بالارونده و پایین‌رونده نشان‌دهنده تغییر شکل در راستای NNW-SSE به میزان حداکثر ۹۰ سانتی‌متر بالاآمدگی در بخش WSW و ۴۰ سانتی‌متر فرونشست در بخش ENE منطقه می‌باشند.

پنگ و همکاران در سال ۲۰۲۳، به بررسی مکانیسم کانونی و تجزیه و تحلیل فعالیت گسل منطقه‌ی لودینگ چین، توسط InSAR پرداختند. این زمین لرزه در ۵ سپتامبر ۲۰۲۲ به بزرگی ۶/۸ ریشتر در شهرستان لودینگ، استان سیچوان چین رخ داد. آنها از رویکرد D-InSAR، برای به دست آوردن میدان جابه‌جایی زمین لرزه، معکوس کردن توزیع لغزش زمین لرزه و سپس محاسبه تغییرات تنش کولن ایستا تغییر شکل زمین لرزه بر روی توزیع پس لرزه‌ها و گسل‌های اطراف استفاده کردند. نتایج آنها نشان داد که حداکثر تغییر شکل سطح ناشی از زمین لرزه لودینگ، حدود ۱۵ سانتی‌متر است (Peng et al., 2023).

عمادعلی و همکاران (۲۰۲۴) به منظور بررسی جابه‌جایی زمین ناشی از زمین لرزه ۱۳۹۹/۱۱/۲۹ شهرستان سی سخت، از تکنیک تداخل سنجی راداری (InSAR) استفاده کردند. چهار تصویر از سنجنده Sentinel-1A تهیه گردید که دو تصویر مربوط به قبل از زمین لرزه و دو تصویر دیگر مربوط به بعد از زمین لرزه در دو حالت مداری پایین‌رونده و بالارونده می‌باشند. این تصاویر با استفاده از نرم‌افزار SNAP پردازش شده و پس از تهیه نقشه تداخل‌نگاشت، نقشه جابه‌جایی زمین در بازه زمانی بین دو تصویر تهیه شد. نتایج نشان داد که بیشینه جابه‌جایی در شهر سی سخت حدود ۷/۲ سانتی‌متر بوده است.

در ۱۷ فوریه ۲۰۲۱ (۲۹ بهمن ۱۳۹۹)، زمین لرزه‌ای به بزرگی ۵/۴ در مقیاس بزرگای گشتاوری، شهرستان سی سخت در استان کهگیلویه و بویراحمد را لرزاند. با وجود آسیب‌های جانی کم، این زمین لرزه خسارات مالی فراوانی از خود به‌جای گذاشت. عمده این

دارد. همان‌گونه که اشاره شد، این فناوری امکان بررسی جابه‌جایی زمین در مناطق وسیع را فراهم آورده است (Shaowei et al., 2021). با توجه به اهمیت جابه‌جایی سطح زمین ناشی از عوامل مختلف (مانند زمین لرزه، فرونشست، زمین لغزش و...) در این زمینه تحقیقات مختلفی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای راداری و تکنیک‌های تداخل سنجی انجام شده است که در زیر به چند مورد از آنها اشاره می‌شود.

مظفری و همکاران در سال ۲۰۲۱، با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری به بررسی زمین لرزه ۲۰۲۱/۲/۱۷ با بزرگای ۵/۵ ریشتر، در شهرستان سی سخت پرداختند. این زمین لرزه باعث ایجاد خسارات زیادی بر بیش از ۸۷ روستای اطراف و همچنین مسدود شدن برخی جاده‌های این محدوده شد. نتایج پردازش‌ها نشان داد که فرونشستی به میزان ۱۵ سانتی‌متر و بالاآمدگی به میزان ۱۱ سانتی‌متر در راستای خط دید ماهواره اتفاق افتاده است (Mozaffari et al., 2021). زورقی و سعدی در سال ۲۰۲۱، به بررسی میزان جابه‌جایی زمین در زمین لرزه سی سخت و سرپل ذهاب پرداختند. در این پژوهش، از تصاویر Sentinel-1 قبل و بعد از وقوع زمین لرزه استفاده شد. نتایج نشان داد، برای شهرستان سرپل ذهاب، میزان بالاآمدگی حدود ۲۵ سانتی‌متر و فرورفتگی، ۶۰ سانتی‌متر است. همچنین، حدود ۵ سانتی‌متر بالاآمدگی و ۷ سانتی‌متر فرورفتگی برای شهرستان سی سخت برآورد گردید (Zoraghi & Saadi, 2021). جریان در سال ۲۰۲۲، مطالعه‌ای با هدف تعیین روند و میزان تغییرات سطح زمین در زمین لرزه سرپل ذهاب با استفاده از روش D-InSAR بر اساس داده‌های سنجنده Sentinel-1A انجام داد. به همین منظور دو تصویر راداری از سنجنده Sentinel-1A قبل و بعد از زمین لرزه تهیه و برای تهیه تداخل‌نگاشت<sup>۲</sup> منطقه مورد مطالعه قرار گرفته است. مقدار جابه‌جایی در شهرستان سرپل ذهاب، بین ۱/۶- تا ۶/۸ سانتی‌متر به دست آمد (Cherian, 2022).

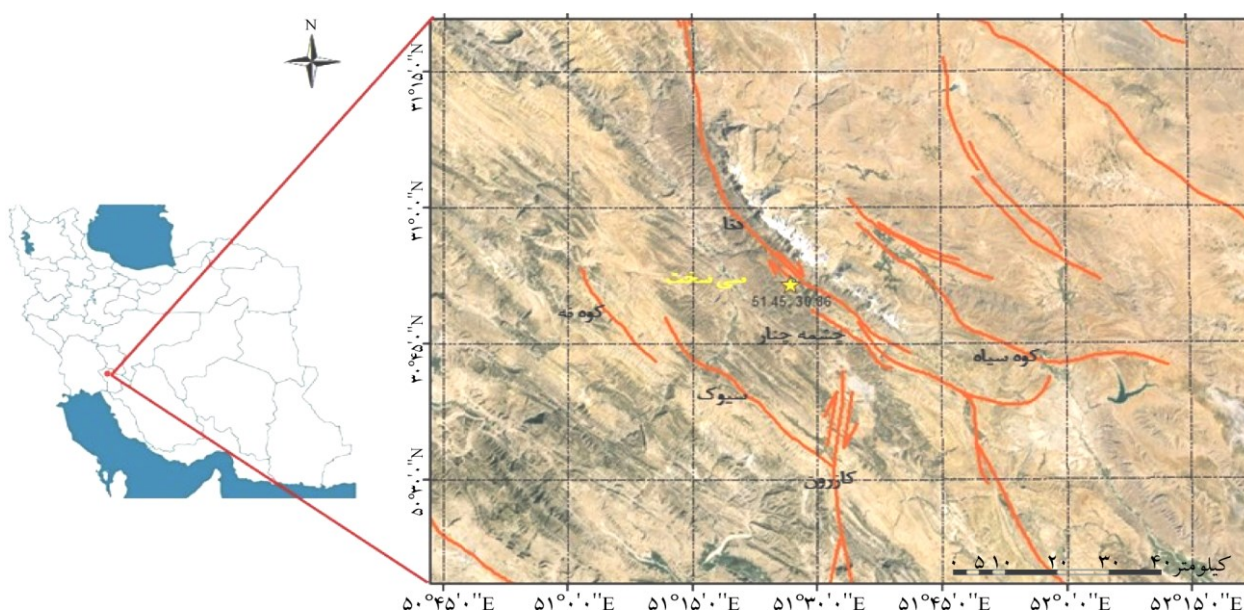
صالح و همکاران در سال ۲۰۲۳ (Saleh et al., 2023) به بررسی زمین لرزه سال ۲۰۱۷ سرپل ذهاب با بزرگای ۷/۴ پرداختند. در این مطالعه، دلایل وقوع این زمین لرزه و ساختار زمین‌شناسی و گسل عامل لرزه مورد بررسی قرار گرفت. بر

شیب تند و ناهمواری‌های فشرده است. یکی از گسل‌های فعال در این ناحیه، گسل دنا است. این گسل، قطعه‌ای از سیستم گسلی کازرون است و طولی معادل، ۱۴۰ کیلومتر دارد. این گسل از جنوب به شمال کشیده شده و طرفین خود را به دو بخش متفاوت از لرزه‌زمین‌ساختی و زمین‌ساختی تقسیم کرده است. در بخش شمال‌غربی سی‌سخت و غرب سمیرم، راستای گسل، شمالی-جنوبی است و طولی معادل ۵۲ کیلومتر دارد. همچنین، در بخش سی‌سخت- یاسوج در راستای کوه زاگرس است و طول آن، ۸۰ کیلومتر است. گسل دنا، از سه قطعه تشکیل شده است که هر کدام از آنها، از نوع گسل امتدادلغز می‌باشد. نقطه پایانی شمال‌غربی این گسل در ۳۰ کیلومتری جنوب شرقی شهر بروجن است و نقطه پایانی جنوب شرق گسل دنا، در ۲۰ کیلومتری شرق شهر یاسوج قرار دارد (Eftekhari, 2024; Mozaffari et al., 2021; Shahriari et al., 2006). زمین‌لرزه‌های ابزاری با بزرگای بیشتر از ۵ به مرکز شهرستان سی‌سخت و به شعاع ۵۰ کیلومتر در جدول (۱) نشان داده شده است. بر اساس گزارش مرکز لرزه‌نگاری مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، در تاریخ ۱۷ فوریه ۲۰۲۱، زمین‌لرزه‌ای با بزرگای ۵/۴ در مقیاس بزرگای گشتاوری و در عمق ۱۰ کیلومتر در منطقه‌ای با طول جغرافیایی ۵۱/۳۱ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۰/۸۴ درجه شمالی رخ داده است. شهرستان سی‌سخت، به‌عنوان

خسارت‌ها در محدوده شهر سی‌سخت مشاهده شد. این مطالعه با هدف تعیین میزان جابه‌جایی زمین در اثر این زمین‌لرزه به کمک تصاویر راداری سنجنده Sentinel-1A به روش تداخل‌سنجی راداری انجام شده است. در این مقاله، ابتدا در خصوص منطقه مورد مطالعه و سابقه لرزه‌خیزی آن به‌طور مختصر توضیحاتی ارائه شده است. در بخش سوم، روش‌شناسی تحقیق، داده‌ها و تصاویر مورد استفاده، نحوه پردازش و پارامترهای مهم در پردازش تصاویر مورد بحث قرار گرفته است. نتایج پردازش تصاویر قبل و بعد از زمین‌لرزه در بخش چهارم آمده است. در بخش نهایی، بحث در مورد نتایج حاصله و نتیجه‌گیری بیان شده است.

## ۲- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه، شهر سی‌سخت واقع در استان کهگیلویه و بویراحمد است. این شهر در ۳۵ کیلومتری شمال‌غربی یاسوج در دامنه رشته‌کوه زاگرس و در نزدیکی قله دنا- بلندترین قله رشته‌کوه زاگرس- واقع شده است (شکل ۱). جمعیت این شهر بر اساس سرشماری سال ۱۳۹۵ در حدود ۱۰ هزار نفر بوده و مساحت آن، حدود ۵/۶ کیلومترمربع است. شهرستان سی‌سخت، در کمربند چین‌خورده زاگرس در قسمت توران و عربی و ایران مرکزی قرار دارد و منطقه‌ای کوهستانی و بسیار لرزه‌خیز است. این منطقه، دارای



شکل (۱): نقشه گسل‌ها در گستره منطقه رخداد زمین‌لرزه و موقعیت شهر سی‌سخت در نقشه ایران. علامت ستاره، موقعیت شهر سی‌سخت را نشان می‌دهد.

جدول (۱): سابقه لرزه خیزی شهرستان سی سخت (مرجع: <https://www.iiees.ac.ir>, ۳۰ آبان ۱۴۰۳).

تاریخ	زمان (UTC)	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	عمق (کیلومتر)	بزرگا	مرجع
۱۹۳۴/۰۲/۰۴	۱۳:۲۷:۰۰	۳۰/۶۵	۵۱/۶۴	۰	Ms: 6.3	AMB
۱۹۶۰/۰۶/۰۷	۲۲:۰۹:۵۱	۳۱	۵۱	۷۰	mb: 5	NOW
۱۹۶۳/۰۵/۰۳	۱۰:۴۴:۳۰	۳۰/۷	۵۱/۶۲	۳۵	mb: 5.3	NOW
۱۹۸۷/۱۰/۰۷	۱۹:۵۴:۳۳	۳۰/۹۱۸	۵۱/۳۰۶	۱۵	mb: 5	EHB
۱۹۸۱/۰۱/۱۰	۰۲:۵۹:۰۶	۳۰/۹۴۶	۵۱/۳۹۵	۳۰	mb: 5.2	EHB
۱۹۹۸/۰۹/۲۱	۲۱:۳۵:۲۷	۳۱/۰۵۸	۵۱/۲۵۸	۲۰	mb: 5.1	EHB
۲۰۰۳/۱۱/۱۸	۲۳:۲۱:۱۳	۳۰/۹۵۵	۵۱/۲۴۵	۱۵	mb: 5.1	EHB
۲۰۱۸/۰۵/۰۲	۰۴:۰۸:۱۴	۳۰/۷۹۸	۵۱/۴۸۸	۱۵	ML: 5.2	IIEES
۲۰۲۱/۰۲/۱۷	۱۸:۳۵:۳۵	۳۰/۸۱۳	۵۱/۴۴۸	۱۲	ML: 5.5	IIEES

طراحی شده و تاکنون پنج سری از آنها برای مأموریت‌های مختلف به فضا پرتاب شده است. مأموریت سنجنده راداری Sentinel-1، تصویربرداری از سطح زمین به منظور آشکارسازی تغییر شکل‌ها و جابه‌جایی نقاط زمینی است. تصویربرداری توسط سنجنده در دو حالت مداری ماهواره شامل مدار بالارونده و مدار پایین‌رونده صورت می‌پذیرد. انتخاب نوع تصاویر بالارونده<sup>۸</sup> یا پایین‌رونده<sup>۹</sup> برای آنالیز تغییر شکل و نیز تحلیل نتایج حاصل بسیار مؤثر بوده و بستگی به جهت تغییر شکل و جهت قرارگیری عارضه مورد بررسی دارد. فاصله زمانی بین دو تصویربرداری متوالی از یک منطقه توسط سنجنده Sentinel-1 (Revisit Time)، ۱۲ روز است. البته امروزه با اضافه شدن ماهواره دوم با سنجنده Sentinel-1، این زمان به ۶ روز کاهش یافته است.

برای استفاده از تکنیک تداخل سنجی، از تصاویری با فرمت SLC<sup>۱۰</sup> و در مد تصویربرداری IWS<sup>۱۱</sup> استفاده گردید. بعد از دانلود تصاویر در تاریخ‌های ذکر شده، یک‌بار پردازش تصاویر در حالت بالارونده و یک‌بار پردازش در حالت پایین‌رونده با استفاده از نرم‌افزار SNAP<sup>۱۲</sup> انجام شد. SNAP، نرم‌افزاری رایگان است که برای پردازش داده‌های ماهواره‌های سری Sentinel و دیگر ماهواره‌های اپتیک و راداری توسط مؤسسه فضایی اروپا توسعه داده شده است. در این تحقیق برای پردازش تصاویر، از نرم‌افزار SNAP استفاده شد.

دلیل استفاده از تصاویر بالارونده و پایین‌رونده این است که

نزدیک‌ترین مکان به مرکز زمین لرزه، در فاصله ۱۱ کیلومتری از مرکز این زمین لرزه واقع شده است. منطقه مورد مطالعه شامل چند گسل اصلی می‌باشد که از آن جمله می‌توان به گسل راستالغز<sup>۳</sup> دنا با طول حدود ۱۰۵ کیلومتر (که تقریباً از وسط شهرستان سی سخت می‌گذرد)، گسل زاگرس مرتفع با طول حدود ۱۳۷۵ کیلومتر، گسل سیوک با طول حدود ۳۰ کیلومتر و گسل کوه نه با طول حدود ۲۶ کیلومتر اشاره نمود (شکل ۱). این زمین لرزه، احتمالاً به علت گسیختگی گسل دنا که قطعه‌ای از سامانه گسلی زاگرس مرتفع (HZF)<sup>۴</sup> می‌باشد، اتفاق افتاده است. جدول (۲) مشخصات این رخداد زمین لرزه را نشان می‌دهد (Jafari and Soghlat, 2021). نقشه گسل‌های موجود در گستره پیرامونی سی سخت نیز در شکل (۱) نشان داده شده است.

جدول (۲): مشخصات رخداد زمین لرزه سی سخت (Jafari et al., 2021).

تاریخ وقوع	۱۳۹۹/۱۱/۲۹ (2021-02-17)
ساعت وقوع	۳۵:۰۵:۲۲ (18:35:35 GMT)
بزرگا	Mw = ۵/۶
عمق کانونی <sup>۵</sup>	8 Km (BHRC)
فاصله رو مرکز <sup>۶</sup> از سی سخت	۷ کیلومتر
شتاب بیشینه در سی سخت	۴۶۴ سانتی متر بر مجذورثانیه
فاصله رو مرکز از یاسوج	۲۴ کیلومتر
شتاب بیشینه در یاسوج	۲۴ سانتی متر بر مجذورثانیه

### ۳- روش شناسی

سنجنده‌های Sentinel، توسط آژانس فضایی اروپا (ESA)<sup>۷</sup>

$$\begin{bmatrix} d_{LOS}^{asc} \\ d_{LOS}^{desc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_{asc} & -\sin \theta_{asc} \cos \alpha_{asc} \\ \cos \theta_{des} & -\sin \theta_{des} \cos \alpha_{des} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_{vert(up-down)} \\ d_{hor(east-west)} \end{bmatrix} \quad (2)$$

که در این معادله  $\theta$ ، زاویه تابش<sup>۱۴</sup> و  $\alpha$ ، آزیموت<sup>۱۵</sup> مدار ماهواره بوده و مقادیر آن مطابق جدول (۳) است (Bayramov et al., 2021).  $d_{LOS}^{asc}$  و  $d_{LOS}^{desc}$  به ترتیب جابه‌جایی‌های به‌دست‌آمده در راستای خط دید ماهواره حاصل از پردازش تصاویر به روش InSAR در دو حالت مدار بالارونده و پایین‌رونده ماهواره می‌باشند. جدول (۴) مشخصات تصاویر مورد استفاده را نشان می‌دهد.

جدول (۳): پارامترهای مداری سنجنده ستینل در دو مدار بالارونده و پایین‌رونده.

حالت مداری	Beam	$\theta$ (درجه)	$\alpha$ (درجه)
صعودی (بالارونده)	IW1	۳۴	۳۵۰
نزولی (پایین‌رونده)	IW3	۴۴	۱۹۰

برای بررسی مناسب بودن دو تصویر برای انجام تکنیک تداخل‌سنجی، از معیار چسبیدگی یا همدوسی<sup>۱۶</sup> استفاده گردید که دامنه تغییرات آن بین ۰ و ۱ بوده و هرچه به عدد یک نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده آن است که تصاویر برای کاربرد جابه‌جایی بهتر هستند. در روش InSAR بازه مناسب برای همدوسی معمولاً از ۰/۶ تا ۱ می‌باشد. معمولاً چنانچه بازه زمانی بین دو تصویر طولانی باشد، این پارامتر کوچک‌تر بوده و لذا، در این گونه موارد بهتر است با استفاده از تعداد تصاویر بیشتر در بازه مورد نظر، از روش‌های سری زمانی مثل PS<sup>۱۷</sup> یا SBAS<sup>۱۸</sup> برای بررسی تغییرات استفاده شود.

در تصاویری که برای پردازش مورد استفاده قرار گرفتند، مقدار

InSAR جابه‌جایی اندازه‌گیری شده را در راستای خط دید ماهواره (LOS)<sup>۱۳</sup> ارائه می‌دهد و از آنجایی که برای بررسی حرکات، نیاز به داشتن مؤلفه‌های جابه‌جایی در راستای محورهای مختصات است ( $dx$ ,  $dy$ ,  $dz$ )، می‌بایست با داشتن حداقل سه معادله به‌عنوان معلومات، سه مجهول (مؤلفه‌های جابه‌جایی) را برآورد نمود. لذا با داشتن جابه‌جایی در هندسه‌های مختلف ماهواره (در مدارهای بالارونده و پایین‌رونده) و در نظر داشتن بعضی پیش‌فرض‌ها، می‌توان این مؤلفه‌ها را استخراج نمود. برای تجزیه سه‌بعدی با اندازه‌گیری‌های جابه‌جایی در راستای خط دید ماهواره، می‌توان نوشت (Bayramov et al., 2021):

$$\begin{bmatrix} d_{LOS}^1 \\ d_{LOS}^2 \\ d_{LOS}^3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & \sin \theta_1 \sin \alpha_1 & -\sin \theta_1 \cos \alpha_1 \\ \cos \theta_2 & \sin \theta_2 \sin \alpha_2 & -\sin \theta_2 \cos \alpha_2 \\ \cos \theta_3 & \sin \theta_3 \sin \alpha_3 & -\sin \theta_3 \cos \alpha_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_{vert(up-down)} \\ d_{hor(north-south)} \\ d_{hor(east-west)} \end{bmatrix} \quad (1)$$

با استفاده از جابه‌جایی‌های به‌دست‌آمده از تصاویر راداری در دو مدار بالارونده و پایین‌رونده سنجنده، دو جابه‌جایی در راستای خط دید ماهواره به دست می‌آید. همان‌گونه که اشاره شد، با وجود سه مجهول جابه‌جایی در راستای سه محور مختصات، باید با معلوم فرض کردن یکی از مجهولات، دو مجهول دیگر برآورد شوند. از آنجایی که حرکت ماهواره در مدار قطبی است، معمولاً دقت برآورد مؤلفه شمالی-جنوبی کمتر بوده و لذا، این مؤلفه را در معادلات در نظر نمی‌گیریم. با حذف مؤلفه شمالی-جنوبی، رابطه (۲) به‌صورت زیر نوشته می‌شود (Bayramov et al., 2021):

جدول (۴): مشخصات تصاویر مورد استفاده.

سنجنده	تاریخ تصویربرداری	Beam	نوع (فرمت) تصویر	حالت مداری	شماره مدار	Polarization
Sentinel-1	۲۰۲۱/۲/۸	IW	SLC	صعودی (Asc.)	۲۸	VV
Sentinel-1	۲۰۲۱/۲/۲۰	IW	SLC	صعودی (Asc.)	۲۸	VV
Sentinel-1	۲۰۲۱/۲/۱۶	IW	SLC	نزولی (Des.)	۱۳۷	VV
Sentinel-1	۲۰۲۱/۲/۲۸	IW	SLC	نزولی (Des.)	۱۳۷	VV

تصویر اتفاق افتاده باشد و در این حالت، مؤلفه اثر توپوگرافی به عنوان سیگنال و سایر مؤلفه‌ها به عنوان نویز تلقی می‌گردند. با این توضیحات، اثر فاز توپوگرافی با استفاده از مدل ارتفاعی رقومی منطقه حذف می‌شود. برای این منظور، مدل ارتفاعی رقومی (SRTM (3 Sec.) با قدرت تفکیک مکانی ۹۰ متر به عنوان DEM منطقه انتخاب شد و برای بهتر نمایش دادن فرینج‌ها و حذف نویزها از فیلتر گلدشتاین<sup>۲۱</sup> استفاده شد. از آنجایی که تصویر تداخل نگاشت حاصل، یک حالت گسسته داشته و تغییرات فاز در بازه‌های  $[0, 2\pi]$  ثبت شده‌اند، برای تعیین جابه‌جایی کلی، می‌بایست این تغییرات یکپارچه شوند. برای این منظور، از فرآیند Unwrapping استفاده می‌شود تا تغییر فاز کلی در بازه زمانی بین دو تصویر مشخص شده و سپس، این تغییر فاز، به جابه‌جایی تبدیل می‌شود. مرحله Unwrapping فاز یکی از مهم‌ترین و زمان‌برترین مراحل در پردازش تصویر به روش InSAR می‌باشد که در این تحقیق، از روش Snaphu برای Unwrapping استفاده شد (Chen & Zebker, 2001).

#### ۴- نتایج و بحث

در این تحقیق، با توجه به اهمیت بررسی جابه‌جایی سطح زمین به منظور پایش و ارزیابی خسارات ناشی از وقوع زمین‌لرزه، میزان جابه‌جایی ایجاد شده در شهرستان سی سخت ناشی از وقوع زمین‌لرزه مورخ ۲۰۲۱/۲/۱۷ برآورد شد. بدین منظور، چهار تصویر از سنجنده Sentinel-1A که دو تصویر مربوط به تاریخ‌های ۲۰۲۱/۲/۸ و ۲۰۲۱/۲/۲۰ بوده و در مدار سعودی (بالارونده) سنجنده بوده و دو تصویر دیگر نیز مربوط به تاریخ‌های ۲۰۲۱/۲/۱۶ و ۲۰۲۱/۲/۲۸ می‌باشد که در مدار نزولی (پایین‌رونده) سنجنده است، انتخاب شد (جدول ۴). پس از انجام مراحل اولیه پردازش و تشکیل تداخل نگاشت‌ها برای هر دو حالت مداری بالارونده و پایین‌رونده ماهواره، مرحله Unwrapping فاز به روش Snaphu انجام شده و فاز کلی تغییر شکل برآورد گردید (Goldstein et al., 1988; Chen et al., 2000; Chen et al., 2001)؛ سپس فاز به دست آمده با استفاده از رابطه زیر به

در مرحله‌ی بعد، برای اینکه یک پیکسل در هر دو تصویر، یک عارضه روی سطح زمین را نشان دهد، دو تصویر با هم، هم‌مرجع‌سازی<sup>۱۹</sup> می‌شوند. در روش InSAR، از ضرب تصویر اول در مزدوج مختلط تصویر دوم می‌توان اختلاف فاز دو تصویر را برای پیکسل‌های متناظر برآورد نمود. تصویری که در این حالت ایجاد می‌شود، تصویر تداخل نگاشت یا اینترفروگرام نامیده می‌شود. در این تصویر، جابه‌جایی به صورت طیف‌های رنگی (فرینج)<sup>۲۱</sup> نمایش داده می‌شود و هر فرینج نشان‌دهنده جابه‌جایی نقاط زمینی به اندازه نصف طول موج سیگنال مورد استفاده در تصویربرداری  $(\lambda/2)$  است. با توجه به اینکه تصاویر سنجنده Sentinel-1 در باند C طیف الکترومغناطیس بوده و دارای طول موجی برابر با ۵۶ میلی‌متر می‌باشند، لذا هر فرینج حاصله در تصویر تداخل نگار معادل ۲۸ میلی‌متر جابه‌جایی در راستای LOS است.

اختلاف فاز اندازه‌گیری شده به روش تداخل سنجی راداری، علاوه بر مؤلفه جابه‌جایی که می‌بایست اندازه‌گیری شود، شامل مؤلفه‌های دیگری نیز می‌باشد که از آن جمله می‌توان به اثر توپوگرافی، اثر اتمسفر، اثر مدار ماهواره و نویز اشاره نمود:

$$\Phi_{Int} = W(\Phi_{Topo} + \Phi_{Def} + \Phi_{Noise} + \Phi_{Atm} + \Phi_{orb}) \quad (3)$$

در این رابطه،  $\Phi_{Int}$  فاز تداخل سنجی،  $\Phi_{Topo}$  نشان‌دهنده فاز توپوگرافی،  $\Phi_{Def}$  فاز تغییر شکل،  $\Phi_{Noise}$  اثر نویز،  $\Phi_{Atm}$  اثر اتمسفر و  $\Phi_{orb}$  اثر مدار ماهواره می‌باشد (Dehghani et al., 2013). البته فاز ناشی از اثر زمین مسطح ( $\Phi_{FE}$ ) نیز باید قبلاً از مشاهدات حذف شده باشد.

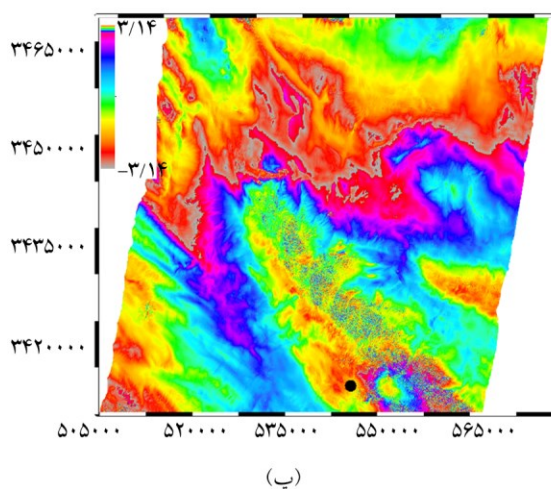
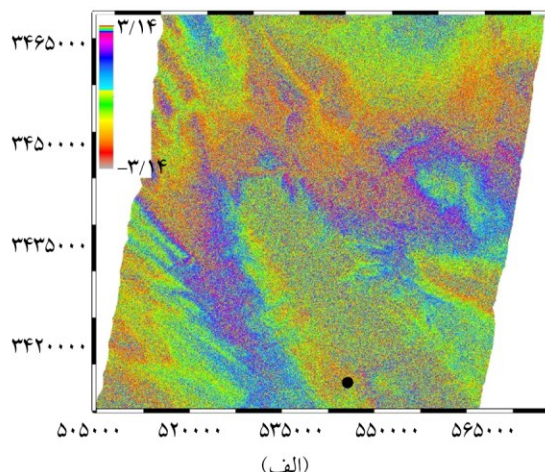
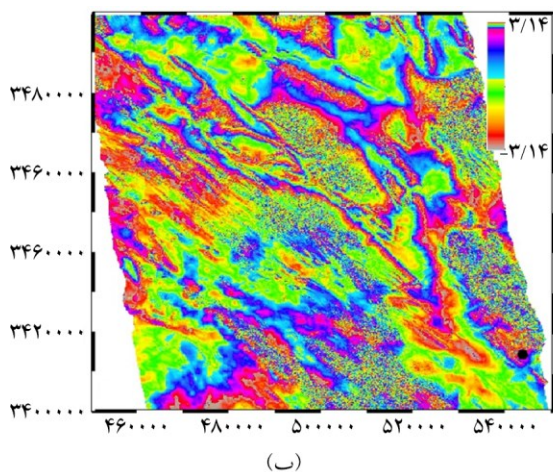
از آنجایی که هدف تعیین میزان جابه‌جایی است، به غیر از مؤلفه جابه‌جایی که در اینجا در واقع نقش سیگنال را دارد، سایر مؤلفه‌های اختلاف فاز که در این مورد نقش نویز را دارند، باید حذف شوند. البته باید توجه داشت که در موارد دیگر ممکن است نوع سیگنال و نویز در مؤلفه‌های تشکیل دهنده اختلاف فاز تغییر کنند. به عنوان مثال، چنانچه هدف تعیین مدل ارتفاعی رقومی (DEM) به کمک تصاویر راداری باشد، در این حالت باید تصاویری انتخاب شوند که کمترین جابه‌جایی ممکن بین دو

از آنجایی که معمولاً تصویر با تاریخ اکتساب زودتر را به‌عنوان مبنا در نظر می‌گیرند، اختلاف فاز مثبت در نقشه تداخل نگاشت به‌عنوان فرونشست تلقی می‌شود، زیرا باعث دور شدن نقطه مورد نظر از سنجنده در فاصله زمانی بین دو تصویربرداری شده است، درحالی‌که مثبت بودن مقادیر جابه‌جایی نشان‌دهنده بالاآمدگی می‌باشد. علامت منفی استفاده شده در رابطه (۴) به همین دلیل استفاده شده است تا این مشکل برطرف گردد. چنانچه تصویر ثانویه به‌عنوان تصویر مبنا در نظر گرفته شود، این تناقض در تعبیر نقشه‌های تداخل نگاشت و جابه‌جایی برطرف می‌شود. شکل (۲) تداخل نگاشت به‌دست آمده از پردازش تصاویر سنجنده Sentinel-1 در دو حالت مداری بالارونده و پایین‌رونده ماهواره را نشان می‌دهد.

جابه‌جایی در راستای خط دید ماهواره تبدیل گردید:

$$d = -\frac{\lambda}{4\pi} \Delta\phi_d \quad (4)$$

در این رابطه،  $d$  جابه‌جایی در راستای خط دید ماهواره در بازه زمانی بین دو تصویر پردازش شده،  $\Delta\phi_d$  اختلاف فاز به‌دست آمده بعد از مرحله Unwrapping و  $\lambda$  طول موج سیگنال اندازه‌گیری سنجنده Sentinel-1 در باند C امواج مایکروویو می‌باشد. برای تهیه نقشه جابه‌جایی از نقشه تداخل نگاشت فاز unwrap شده، می‌بایست مقادیر فاز با استفاده از رابطه (۴) به مقادیر جابه‌جایی در راستای خط دید تبدیل شوند. در مورد تعبیر مقادیر فاز مثبت یا منفی در نقشه تداخل نگاشت باید به این نکته توجه داشت که مقادیر برآورد شده بستگی به نحوه انتخاب تصاویر مبنا<sup>۲۱</sup> و پیرو<sup>۲۳</sup> دارد.



شکل (۲): تداخل نگاشت حاصل از پردازش تصاویر راداری سنجنده Sentinel-1 مربوط به زمین‌لرزه سی‌سخت؛ (الف) تداخل نگاشت بدون اعمال فیلتر گلداشتاين و بدون مولتی‌لوک؛ (ب) تداخل نگاشت بعد از اعمال فیلتر گلداشتاين و مولتی‌لوک ۸ × ۲ برای حالت مداری بالارونده و (پ) تداخل نگاشت بعد از اعمال فیلتر گلداشتاين و مولتی‌لوک ۸ × ۲ برای حالت مداری پایین‌رونده. دایره سیاه‌رنگ موقعیت شهر سی‌سخت را نشان می‌دهد.

زمین لرزه، بخشی از سامانه گسلی زاگرس مرتفع (HZF) بوده و گسلی طولانی با طولی در حدود ۱۰۵ کیلومتر است (Jafari et al., 2021)، ممکن است سازوکار گسل در قسمت‌های مختلف متفاوت باشد. با این حال و با استناد به گزارش‌های زمین‌شناسی و نقشه گسل‌های کشور، نوع گسل در محدوده مجاور شهرستان سی سخت از نوع امتدادلغز راست‌گرد بیان شده است.

پدیده‌هایی مثل زمین لرزه می‌توانند جابه‌جایی‌هایی با بزرگی مختلف را در جهت‌های مختلف ایجاد نمایند. مقدار به‌دست‌آمده برای مؤلفه شرقی-غربی جابه‌جایی در شهرستان سی سخت برابر با ۱۶۱- میلی‌متر (در جهت غرب) می‌باشد که نسبت به مؤلفه جابه‌جایی در راستای قائم (۶ میلی‌متر) عدد بسیار بزرگ‌تری بوده و نشان‌دهنده نوع حرکت گسل در صفحه افقی است که مشخصه گسل‌های امتدادلغز است. از طرفی، مقدار محاسبه شده برای مؤلفه قائم نیز نشان‌دهنده جابه‌جایی جزئی در صفحه قائم ناشی از حرکت صفحات گسل است که مشخصه گسل‌های رورونده و معکوس است و گسل دنا نیز دارای خاصیت رانندگی می‌باشد.

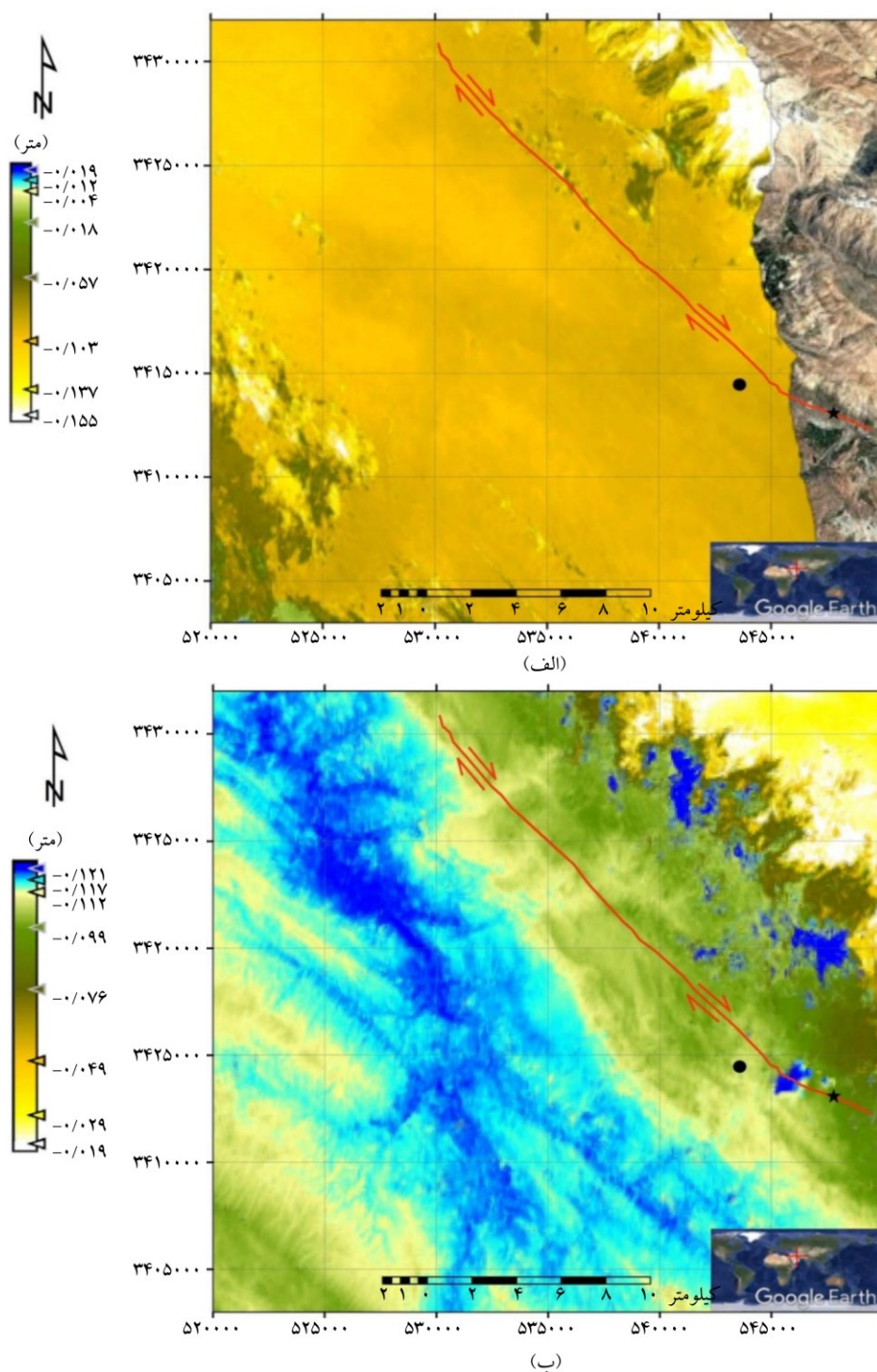
به دلیل مجاورت منطقه سی سخت با رشته‌کوه زاگرس و قله دنا، تغییرات شدید توپوگرافی در منطقه مورد مطالعه وجود داشته و لذا، همدوسی بین تصاویر پردازش شده پایین است؛ در نتیجه فرینج‌های رنگی در تصاویر، یک سیکل کامل تشکیل نداده است (Mozaffari et al., 2021). با این حال، با اعمال مولتی لوک بر روی تداخل نگاشت‌های به‌دست‌آمده از پردازش تصاویر بالارونده و پایین‌رونده، در بعضی از نقاط تصاویر - به‌خصوص در حالت مداری پایین‌رونده - فرینج‌های ایجاد شده در نزدیکی مرکز لرزه مشاهده می‌شوند (شکل ۲)؛ ضمن اینکه زمین لرزه مورد بررسی از شدت و بزرگای بالایی برخوردار نبوده (M5.4) و خرابی‌های ایجاد شده در ساختمان‌ها عمدتاً به دلیل ضعف سازه‌ای در دیوارها و میان‌قاب‌ها، عدم ساخت‌وساز اصولی و عدم رعایت نکات آیین‌نامه‌های موجود از جمله آیین‌نامه ۲۸۰۰ می‌باشد (Jafari et al., 2021).

شکل (۲-الف) تداخل نگاشت اولیه بدون اعمال فیلتر گلدشتاین را نشان می‌دهد. همان‌گونه که از شکل مشخص است، با توجه به شدت نسبتاً کم زمین لرزه، فرینج‌ها به وضوح قابل رؤیت نیستند. به همین منظور، با اعمال مولتی لوک<sup>۲۴</sup> بر روی تصویر تداخل نگاشت و انجام مرحله فیلتر کردن با فیلتر گلدشتاین، شکل‌های (۲-ب) و (۲-پ) ایجاد شد که به نحو مطلوب تری وضعیت تداخل نگاشت حاصل از پردازش تصاویر قبل و بعد از وقوع زمین لرزه را نشان می‌دهد. در فرآیند مولتی لوک با متوسط‌گیری از مقادیر پیکسل‌های مجاور، سعی در کاهش مقدار نویز می‌باشد.

شکل‌های (۳-الف) و (۳-ب) نقشه جابه‌جایی ایجاد شده در اثر زمین لرزه سی سخت با بزرگای گشتاوری  $M 5/4$  را که از پردازش تصاویر سنجنده Sentinel-1A به ترتیب در حالت‌های مداری بالارونده و پایین‌رونده ماهواره به دست آمده است، نشان می‌دهد. مرکز شهر سی سخت و مرکز زمین لرزه در نقشه‌ها مشخص شده است. میزان جابه‌جایی ناشی از زمین لرزه رخ داده در راستای خط دید ماهواره (LOS) برای تصاویر صعودی ۱۰۳ میلی‌متر و برای تصاویر نزولی، ۹۹ میلی‌متر برآورد گردید (شکل‌های ۳-الف و ۳-ب).

از آنجایی که جابه‌جایی‌های به‌دست‌آمده از پردازش تصاویر در دو حالت مداری بالارونده و پایین‌رونده ماهواره در راستای خط دید ماهواره است، برای تجزیه مقادیر جابه‌جایی به مؤلفه‌های شرقی-غربی (East-West) و بالا-پایین (Up-Down) از رابطه (۲) استفاده شده و دو مؤلفه جابه‌جایی برای هر پیکسل برآورد شده و نقشه جابه‌جایی برای مؤلفه‌های شرقی-غربی و بالا-پایین تهیه گردید. پس از برآورد مؤلفه‌ها، مقدار جابه‌جایی در شهر سی سخت برای مؤلفه شرقی-غربی و مؤلفه بالا-پایین به ترتیب برابر با ۱۶۱- و ۶+ میلی‌متر محاسبه شد. شکل‌های (۴-الف) و (۴-ب) به ترتیب مؤلفه‌های بردار جابه‌جایی حاصل از زمین لرزه سی سخت در راستای شرقی-غربی (East-West) و بالا-پایین را نشان می‌دهند.

با توجه به اینکه گسل دنا، به‌عنوان عامل اصلی ایجاد این



شکل (۳): جابه‌جایی در راستای LOS به‌دست آمده از پردازش تصاویر Sentinel-1A؛ (الف) جابه‌جایی به‌دست آمده از پردازش تصاویر در مدار بالارونده (Ascending) ماهواره؛ (ب) جابه‌جایی به‌دست آمده از پردازش تصاویر در مدار پایین‌رونده (Descending) ماهواره. دایره سیاه موقعیت شهر سی‌سخت و علامت \* مرکز زمین‌لرزه را نشان می‌دهد. مختصات مرکز زمین‌لرزه از اطلاعات ارائه شده مرکز لرزه‌نگاری کشور استخراج گردیده است.

همچنین این مقادیر برای حالت مداری پایین‌رونده بین مقادیر  $0/02-$  و  $0/13+$  متر تغییر می‌کنند (شکل ۳-ب). با توجه به شکل‌های (۳-الف) و (۳-ب) جابه‌جایی به‌دست آمده در

برای منطقه مورد مطالعه، مقادیر جابه‌جایی در راستای خط دید در حالت مداری بالارونده ماهواره تقریباً در بازه عددی بین مقادیر  $0/25-$  و  $0/16+$  متر متغیر می‌باشند (شکل ۳-الف).

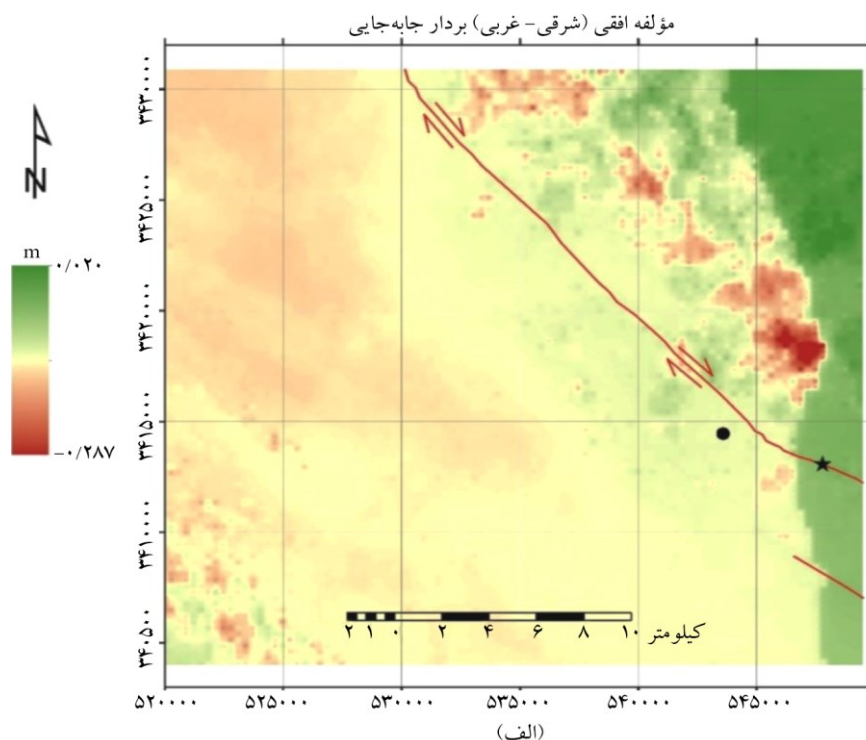
است. با این توضیحات و با تجزیه مقادیر جابه‌جایی در راستای خط دید ماهواره به مؤلفه‌های افقی و قائم، نقشه‌های جابه‌جایی برآورد شده برای محدوده مورد مطالعه و مرکز شهر سی سخت تهیه شده است (شکل ۴).

برای صحت‌سنجی نتایج به‌دست آمده از روش InSAR و همچنین تصمیم‌گیری در مورد حذف بعضی از مؤلفه‌ها برای تعیین سایر مؤلفه‌های جابه‌جایی، وجود سایر داده‌های تکمیلی الزامی است. از مواردی که می‌توان اشاره نمود، داده‌های سری زمانی به‌دست آمده از ایستگاه‌های دائم GNSS<sup>۲۵</sup> موجود در منطقه و یا در مجاورت گسل و همچنین مشاهدات ترازیبی مستقیم دقیق است (Emadali et al., 2017).

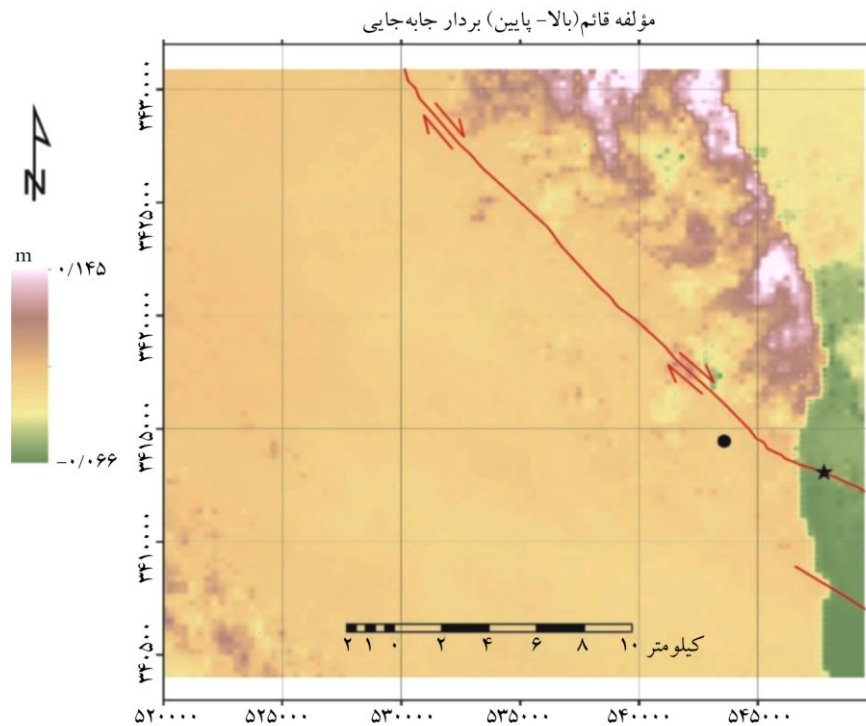
متأسفانه در منطقه مورد مطالعه، هیچ ایستگاه دائمی وجود ندارد و نزدیک‌ترین ایستگاه به این منطقه و شهر سی سخت، ایستگاه دائم شیراز می‌باشد که تقریباً در فاصله ۲۱۰ کیلومتری منطقه بوده و لذا نمی‌توان به آن استناد دقیقی نمود.

راستای خط دید در پردازش تصاویر بالارونده برای مرکز شهر سی سخت، حدود ۱۰۳+ میلی‌متر و جابه‌جایی به‌دست آمده از پردازش تصاویر پایین‌رونده در مرکز شهر سی سخت، حدود ۹۹- میلی‌متر برآورد می‌گردد. تفسیر علامت و جهت جابه‌جایی اندازه‌گیری شده باید به دقت انجام شود که همان‌گونه که قبلاً اشاره شد، بستگی به نحوه انتخاب تصاویر مبنا و پیرو و همچنین حالت تصویربرداری مدار ماهواره (بالارونده یا پایین‌رونده) دارد.

تصاویر تداخل‌نگاشت با در نظر گرفتن ماهواره به‌عنوان مبنای اندازه‌گیری و میزان دور یا نزدیک شدن نقاط زمینی به ماهواره در فاصله بین دو تصویربرداری تشکیل می‌شوند و بر این اساس، تغییر فاز مثبت نشان‌دهنده دور شدن نقاط از ماهواره است. این موضوع در نقشه جابه‌جایی که با استفاده از رابطه (۴) از نقشه تداخل‌نگاشت به دست می‌آید، مترادف با فرونشست در نظر گرفته می‌شود. برای تصاویر در حالت مداری بالارونده، علامت مثبت در جابه‌جایی مترادف با فرونشست و علامت منفی معادل بالآمدگی نقاط زمینی



شکل (۴): تجزیه بردار جابه‌جایی ناشی از زمین‌لرزه شهرستان سی سخت؛ (الف) مؤلفه افقی جابه‌جایی در راستای شرقی-غربی (East-West) و (ب) مؤلفه قائم جابه‌جایی در راستای بالا-پایین (Up-Down). دایره مشکی موقعیت شهر سی سخت و علامت \* مرکز زمین‌لرزه را نشان می‌دهد. مختصات مرکز زمین‌لرزه از اطلاعات ارائه شده مرکز لرزه‌نگاری کشور استخراج شده است.



(ب)  
شکل ۴. (۴)

## ۵- نتیجه‌گیری

منظور از مشاهدات، بردارهای جابه‌جایی dLOS حاصل از سه هندسه مختلف و مستقل ماهواره است. از آنجایی که تصاویر سنجنده‌های مختلف راداری در دو حالت مداری بالارونده و پایین‌رونده برداشت می‌شوند، از هر منطقه مورد مطالعه، معمولاً دو مشاهده (تصویر) موجود است. لذا، باید با استناد به سایر داده‌ها و مشاهدات زمینی، یک یا دو مؤلفه از مؤلفه‌های مجهول جابه‌جایی را حذف یا به‌عنوان معلوم در نظر گرفت تا با دو مشاهده به‌دست آمده از مدارهای بالارونده و پایین‌رونده سنجنده، مؤلفه مجهول برآورد شود. به‌عنوان مثال، در ارزیابی فرونشست یک منطقه، با فرض اینکه عمده جابه‌جایی در راستای قائم است، می‌توان دو مؤلفه جابه‌جایی مسطحاتی را نادیده گرفته و بردار جابه‌جایی dLOS را در راستای قائم تصویر نمود تا میزان فرونشست به دست بیاید. وجود مشاهدات و داده‌های ژئودتیک زمینی مثل مشاهدات ترازیابی دقیق در این زمینه می‌تواند بسیار مؤثر باشد. راه‌حل دوم این است که از مشاهدات سایر سنجنده‌های راداری که هندسه مداری نزدیک به سنجنده Sentinel دارند، بهره‌گرفته و با

در این پژوهش، جابه‌جایی سطح زمین ناشی از وقوع زمین‌لرزه ۲۹ بهمن سال ۱۳۹۹ شهرستان سی‌سخت با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری InSAR و با بهره‌گیری از تصاویر راداری سنجنده Sentinel-1 ارزیابی گردید. با ملاحظه نقشه‌های جابه‌جایی در راستای خط دید ماهواره و نقشه‌های دو مؤلفه جابه‌جایی در راستای شرقی-غربی و بالا-پایین، باید به چند نکته اشاره کرد:

- در روش تداخل‌سنجی راداری InSAR، جابه‌جایی به‌دست آمده برای هر پیکسل در راستای خط دید ماهواره (LOS) اندازه‌گیری می‌شود. برای تعیین مؤلفه‌های جابه‌جایی در راستای محورهای سیستم مختصات  $(dx, dy, dz)$ ، می‌بایست بردار جابه‌جایی dLOS را از هندسه‌های مختلف تصاویر به دست آورد و سپس با استفاده از روابط ریاضی موجود (رابطه ۱) مؤلفه‌های بردار جابه‌جایی را به دست آورد. بدیهی است برای این منظور با توجه به تعداد مجهولات یعنی سه مؤلفه بردار جابه‌جایی، حداقل به سه مشاهده نیاز است که

سازوکارهای مختلفی مثل نرمال، معکوس یا امتداد- لغز برخوردار باشد که این نتایج امتداد لغز بودن گسل در محدوده شهرستان سی سخت و محدوده مورد مطالعه تأیید می‌کند.

بر این اساس و با توجه به بزرگی مؤلفه افقی جابه‌جایی نسبت به مؤلفه قائم و نیز نوع گسیختگی‌های مشاهده شده در منطقه، به نظر می‌رسد که مقادیر محاسبه شده برای میدان جابه‌جایی با واقعیت مطابقت داشته باشد. متأسفانه گزارش مشاهدات و بازدیدهای زمینی کارشناسان زمین‌شناسی و ژئوفیزیک پس از زمین‌لرزه در دسترس نبوده و یا در اختیار این گروه قرار نگرفت تا با مقایسه و ارزیابی نتایج به‌دست‌آمده با مشاهدات زمینی، بتوان بحث دقیق‌تری در خصوص سازوکار گسل مورد مطالعه و نیز صحت و تقسیم جابه‌جایی‌های ایجاد شده در اثر این زمین‌لرزه را ارائه نمود.

### سپاسگزاری

این تحقیق با حمایت مرکز نوآوری دانشگاه صنعتی خاتم‌الانبیاء بهبهان تحت عنوان "مرکز پایش، ارزیابی و مدیریت بحران‌های ناشی از بلایای طبیعی (MAP)" انجام شده است. به این وسیله مراتب سپاس و قدردانی نویسندگان از مدیریت این مرکز به‌عمل می‌آید.

### References

- Bayramov, E., Buchroithner, M., Kada, M., & Zhuniskenov, Y. (2021). Quantitative assessment of vertical and horizontal deformations derived by 3D and 2D decompositions of InSAR line-of-sight measurements to supplement industry surveillance programs in the Tengiz oilfield (Kazakhstan). *Remote Sensing*, 13(13), 2579.
- 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:10.1109/TGRS.2002.803792
- Chen, C. W., & Zebker, H. A. (2000). Network

ترکیب مشاهدات سنجنده‌های مختلف، مؤلفه‌های جابه‌جایی را تعیین نمود ( Zhao et al., 2019; Shamshiri et al., 2019; Haghshenas Haghghi et al., 2014).

فرض بر این است که جابه‌جایی اندازه‌گیری شده در بازه زمانی بین دو تصویر ناشی از حرکات زمین در اثر زمین‌لرزه رخ داده در این بازه زمانی بوده است. از آنجایی که در این فاصله زمانی ۱۲ روزه ممکن است عوامل طبیعی دیگری مثل فرونشست یا زمین‌لغزش نیز در ایجاد جابه‌جایی نقاط نقش داشته باشند، لذا لازم است که با استفاده از تعداد بیشتری تصویر و به‌کارگیری روش سری زمانی<sup>۲۶</sup> تغییرات، نرخ جابه‌جایی را در یک بازه زمانی طولانی‌تر به دست آورد. انجام مشاهدات ترازیبی دقیق در منطقه مورد مطالعه نیز می‌تواند در کنترل نتایج به‌دست‌آمده از روش تداخل‌سنجی، برای مؤلفه قائم، کمک نماید.

موقعیت دقیق مرکز لرزه معمولاً مشخص نبوده و در گزارش مراکز مختلف لرزه‌نگاری، مختصات متفاوت و اعماق مختلف برای مرکز وقوع زمین‌لرزه ارائه می‌شود. همچنین، راستای دقیق گسل‌ها نیز مشخص نبوده و چه‌بسا در مواردی گسل‌های پنهان<sup>۲۷</sup> باعث وقوع زمین‌لرزه شده‌اند که نمونه بارز آن، گسل عامل رخداد زمین‌لرزه بم است؛ بنابراین، در مواردی ممکن است نقشه جابه‌جایی با راستای گسل مطابقت کامل نداشته باشد که البته در این تحقیق، مؤلفه‌های جابه‌جایی، به‌خصوص مؤلفه افقی جابه‌جایی، تا حد زیادی با راستای گسل امتدادلغز مطابقت دارند. در همین راستا، علم سنجش‌ازدور و تصاویر سنجنده‌های مختلف راداری و اپتیکی می‌توانند برای تعیین دقیق راستای گسل‌ها نقش بسزایی ایفا نمایند.

با ملاحظه مقادیر مؤلفه‌های جابه‌جایی و با توجه به اینکه مقدار عددی مؤلفه شرقی- غربی در مقایسه با مؤلفه بالا- پایین بسیار بزرگ‌تر است، می‌توان نوع گسل را در منطقه مورد مطالعه از انواع گسل امتدادلغز عنوان نمود. لازم به ذکر است که با توجه به طولانی بودن گسل دنا، ممکن است در قسمت‌های مختلف از

- Mehrpak, M., Eftekhari, N., Motaghd, S., & Emadali, L. (2024). Evaluation of surface displacement resulted from 17 Feb. 2017 Sisakht earthquake by InSAR method. *9<sup>th</sup> International Conference on Seismology and Earthquake Engineering*, Tehran, Iran.
- Mozaffari, M., Khoshlahje, M., & Maghsoudi, Y. (2021). Displacement analysis of the Sisakht earthquake using SAR interferometry. *National Conference on Technologies and New Geomatics*, Tabriz University (in Persian).
- Peng, W., Huang, X., & Wang, Z. (2023). Focal mechanism and regional fault activity analysis of 2022 Luding strong earthquake constraint by InSAR and its inversion. *Remote Sensing*, 15(15), 3753.
- Saleh, M., Meghraoui, M., & Cetin, E. (2023). The 12 November 2017 Mw 7.4 earthquake in Sarpol-e-Zahab (Iran-Iraq): a complex fault rupture in the Zagros Mountains. *Mediterranean Geoscience Reviews*, 5, 177-188.
- Shahriari, S., Farhoudi, G., & Eghbalpour, E. (2006). Investigating the relationship between the shape of the northern half of Dana Mountain and the geometry of the Dana Fault. *10<sup>th</sup> Symposium of the Geological Society of Iran*, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran (in Persian).
- Shamshiri, R., Motagh, M., Baes, M. & Sharifi, M.A. (2014). Deformation analysis of the Lake Urmia causeway (LUC) embankments in northwest Iran: insights from multi-sensor interferometry synthetic aperture radar (InSAR) data and finite element modeling (FEM). *Journal of Geodesy* 88(12):1171-1185. DOI: 10.1007/s00190-014-0752-6
- Shaowei, L., Xu, W., & Li, Z. (2021). Review of the SBAS InSAR time-series algorithms, applications, and challenges. *Geodesy and Geodynamics*, 12(2), 99-110.
- Shrestha, M. G. (2022). *Earthquake Induced Displacement and Livelihoods: The Case of Severely Affected Districts of Nepal* [Master's Thesis].
- Zhao, Q., Ma, G., Wang, Q., Yang, T., Liu, M., Gao, W., Falabella, F., Mastro, P., & Pepe, A. (2019). Generation of long-term InSAR ground displacement time-series through a novel multi-sensor data merging technique: The case study of the Shanghai coastal area. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 154, 10-27.
- approaches to two-dimensional phase unwrapping: Intractability and two new algorithms. *Journal of the Optical Society of America A*, 17(3), 401-414.
- Chen, C. W., & Zebker, H. A. (2001). Two-dimensional phase unwrapping with use of statistical models for cost functions in nonlinear optimization. *Journal of the Optical Society of America A*, 18(2), 338-351.
- Cherian, J. (2022). \*Determining the amount of earthquake displacement using differential synthetic aperture radar interferometry (D-InSAR) and satellite images of Sentinel-1 A: A case study of Sarpol-e Zahab city\* [Manuscript].
- Dehghani, M., Valadan Zoej, M. J., Entezam, I., Mansourpour, M., & Saatchi, S. (2013). Hybrid conventional and persistent scatterer SAR interferometry for land subsidence monitoring in the Tehran Basin, Iran. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 79, 157-170.
- Eftekhari, S. M. (2024). Analysis of geomorphometric changes in Dena city due to Sisakht earthquake using differential interferometry (DInSAR) technique. *Journal of Applied Researches in Geographical Sciences*, 74(24), 252-270. doi: 10.61186/jgs.24.74.25 (in Persian).
- Emadali, L., Motagh, M., & Haghshenas Haghghi, M. (2017). Characterizing post-construction settlement of the Masjed-Soleyman embankment dam, southwest Iran, using TerraSAR-X Spotlight radar imagery. *Engineering Structures*, 143, 261-273.
- Goldstein, R. M., Zebker, H. A., & Werner, C. L. (1988). Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping. *Radio Science*, 23(4), 713-720.
- Haghshenas Haghghi, M., & Motagh, M. (2019). Ground surface response to continuous compaction of aquifer system in Tehran, Iran: Results from a long-term multi-sensor InSAR analysis. *Remote Sensing of Environment*, 221, 534-550.
- International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran, www.iiees.ac.ir
- Jafari, M., & Soghrat, M. R. (2021). *Preliminary Report of the Sisakht Earthquake (M 5.4) on February 29, 2021, Sisakht, Iran*. Natural Disasters Research Institute (in Persian).

Blind Fault

۲۷- گسل های پنهان

Zoraghi, M., & Saadi, R. (2021). Evaluation of displacement caused by Sisakht and Sarpol-e Zahab earthquakes using radar interferometry technique. *National Conference on Technologies and New Geomatics*, Tabriz University (in Persian).

### واژه نامه

Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR)	۱- تداخل سنجی راداری با رادار روزنه ترکیبی
Interferogram	۲- تداخل نگاشت
Strike-Slip Fault (SSF)	۳- گسل راستالغز
High Zagros Fault Zone	۴- سامانه گسلی زاگرس مرتفع
Focal Depth	۵- عمق کانونی
Epicenter	۶- فاصله رو مرکز
European Space Agency (ESA)	۷- توسط آژانس فضایی اروپا
Ascending	۸- بالارونده
Descending	۹- پایین رونده
Single Look Complex (SLC)	۱۰- تصاویری با فرمت SLC
Interferometric Wide Swath (IWS)	۱۱- مد تصویربرداری IWS
Sentinels Application Platform (SAP)	۱۲- حالت پایین رونده با استفاده از نرم افزار SNAP
Line-Of-Sight (LOS)	۱۳- راستای خط دید ماهواره
Incidence Angle	۱۴- زاویه تابش
Azimuth	۱۵- آزیموت
Coherency	۱۶- معیار چسبیدگی یا همدوسی
Permanent Scatterer	۱۷- روش های سری زمانی مثل PS
Small Baseline Subset (SBAS)	۱۸- روش های سری زمانی مثل SBAS
Co-registering	۱۹- هم مرجع سازی
Fringe	۲۰- فرینج
Goldstein Filter	۲۱- فیلتر گلدشتاین
Master Image	۲۲- تصاویر مبنا
Slave Image	۲۳- تصاویر پیرو
Multi Looking	۲۴- اعمال مولتی لوک
GNSS Permanent Station	۲۵- ایستگاه های دائم
Time Series Analysis	۲۶- روش سری زمانی

## Determination of Displacement Components of Sisakht Earthquake (M 5.4) by Radar Interferometry (InSAR)

Lotfollah Emadali<sup>1\*</sup>, Mozhgan Mehrpak<sup>2</sup>, Sasan Motaghed<sup>3</sup> and Nasrollah Eftekhari<sup>4</sup>

1. Assistant Professor, Civil Engineering Department, Engineering Faculty, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology, Behbahan, Iran, \*Corresponding Author, email: emadali@bkatu.ac.ir
2. M.Sc. Student in Construction Engineering, Civil Engineering Department, Engineering Faculty, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology, Behbahan, Iran
3. Assistant Professor of Civil Engineering Department, Engineering Faculty, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology, Behbahan, Iran
4. Assistant Professor, Faculty of Technology and Mining, Yasuj University, Choram, Iran

A significant consequence of an earthquake is the generation of horizontal and vertical displacements on the Earth's surface. These displacements can lead to substantial human and financial losses, varying according to the earthquake's intensity and location. Given Iran's position along the seismically active belt and the presence of the vast Alborz and Zagros mountain ranges, it is crucial to monitor the movements of numerous faults in regions adjacent to these mountains. Over the past two decades, remote sensing techniques utilizing satellite radar imagery have been vital for forecasting and assessing ground movements. In this article, we used InSAR technique and Sentinel-1 radar images to investigate the surface displacement caused by the February 17, 2021 earthquake in Sisakht, Iran. Four images from the Sentinel-1A sensor, captured before and after the earthquake in both ascending and descending modes, were processed in the SNAP software. The results indicate that the maximum displacement in Sisakht is approximately 10 cm along the line of sight (LOS). Decomposing the LOS displacement revealed estimated values of -161 mm for the east-west component and 6 mm for the up-down component.

Considering the extent of the Iran and its location on the main earthquake belt, as well as the presence of many faults with high seismicity in most regions of the country - especially in the areas adjacent to the Zagros and Alborz mountain- the use of classical mapping techniques, due to time-consuming mapping methods and high labor costs, it is almost impossible to measure and monitor deformation. For this purpose, in recent years, remote sensing and radar imaging-based technologies have been widely used to monitor large areas in short periods of time. Among these technologies, the radar interferometry method is combined with the aperture radar, which is called the InSAR method for short. One of the most important effects of an earthquake is the creation of horizontal and vertical displacements on the earth's surface, as a result of which - according to the intensity and the region of the earthquake- many human and financial losses may occur. Considering Iran's location on the earthquake belt and the presence of two huge mountain ranges, Alborz and Zagros, monitoring the movements of many faults in the areas adjacent to these mountain ranges is very important. The use of remote sensing method based on the use of satellite radar images has played a very important role in predicting and measuring earth movements in the last two decades. In this article, in order to investigate the ground displacement caused by Sisakht earthquake, the technique of radar interferometry (InSAR) has been used. For this purpose, by using the four images obtained from the Sentinel-1A sensor before and after the earthquake in the ascending and descending states of the satellite orbit and processing these images in the SNAP software, the ground displacement map due to the occurrence of this earthquake was created. The results showed that the maximum displacement in Sisakht city is about 10 cm along the line of sight of the satellite. By dividing the displacement obtained along the line of sight into two displacement components in the east-west (x component) and up-down (z component) displacement map was prepared in both x and z directions. These maps provide basic information required for earthquake engineering processes.

**Keywords:** Radar Interferometry, Earthquake, Displacement Components, Dena Fault.