

دو فصلنامه کواترنری ایران (علمی-پژوهشی)، دوره ۹، شماره ۲ و ۱، بهار و تابستان ۱۴۰۲

ص ۱۴ تا ۲۸

جابجایی عمودی ناشی از زلزله ۵/۸ ریشتری ۲۹ فروردین ۱۴۰۰ بندر گناوه با استفاده از تداخل سنجی راداری شاهدی بر گسترش پیش ژرفای کواترنری زاگرس

عبدالرضا پرتابیان؛ دانشیار تکتونیک، گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه سیستان و بلوچستان زاهدان

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۳۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۳/۱۰

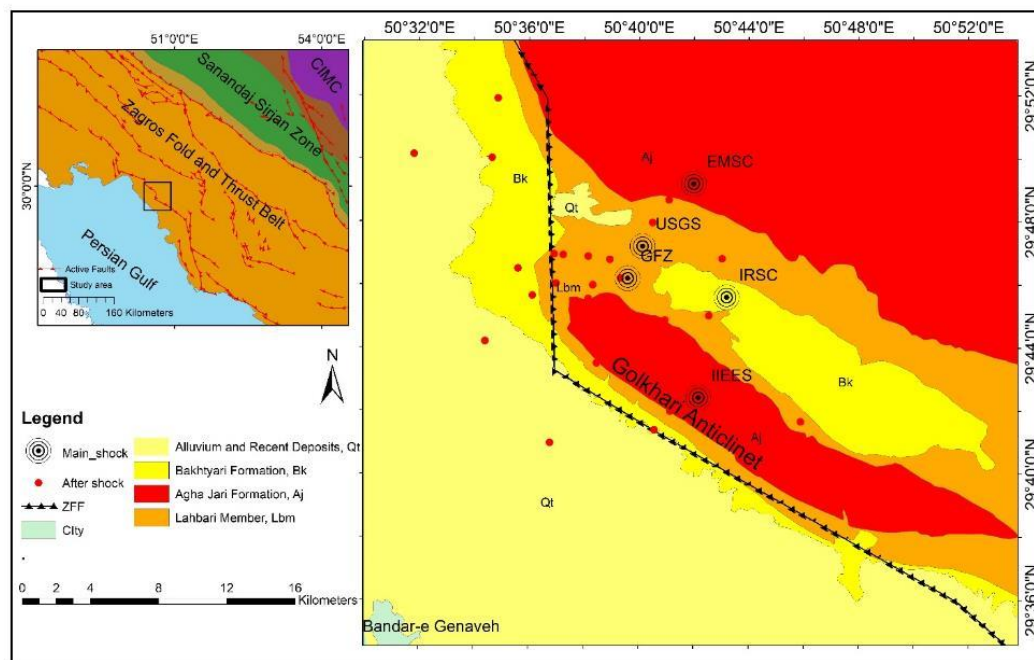
چکیده:

زلزله ای با بزرگی ۵/۸ در تاریخ ۲۹ فروردین ۱۴۰۰ در شمال شرقی بندر گناوه رخ داد. فوکل مکانیسم این زلزله نشان دهنده این است که یک گسل تراستی با امتداد شمال غرب- جنوب شرق و شیب کم به سمت شمال شرق در عمق ۱۰ کیلومتری عامل آن بوده است. رومرکز این زلزله بر روی تاقدیس بلخاری و نزدیک به گسل پیشانی کوهستان زاگرس به عنوان یک گسل فعال کواترنری قرار گرفته است. در این مطالعه با استفاده از آنالیز تداخل سنجی راداری (InSAR) دو تصویر سنتینل ۱ قبل و بعد از زلزله مقدار جابجایی عمودی ایجاد شده در هنگام زلزله به دست آمد. نتایج نشان دهنده، تغییرات سطحی بالا آمدگی، به صورت یک بیضی دوکی شکل با حداکثر ۱۶۵ میلی متر در محدوده سوبه شمال غربی تاقدیس بلخاری و فرونشست ۹ میلی متری می باشد. بررسی و مقایسه بیضی تغییرات سطحی با رومرکز، پس لرزه ها، میزان تخریب سطحی زمین، روستا های آسیب دیده و مرز کوه و دشت نشان دهنده پیشرفت کوهزایی زاگرس به سمت جنوب غرب و شمال غرب با رشد تاقدیس بلخاری بر اثر این زلزله و در ادامه دگرشکلی دوره کواترنری این کمربند می باشد.

واژگان کلیدی: تاقدیس بلخاری، تراست پنهان، سنتینل ۱، دگرشکلی همراه با لرزه، دگرشکلی کواترنری.

مقدمه:

امروزه استفاده از اطلاعات تداخل سنجی راداری (InSAR) به منظور ارزیابی دگرشکلی سطحی زلزله های با بزرگی متوسط به خوبی مورد ارزیابی قرار گرفته است. این اطلاعات قادر خواهند بود تغییرات سطح زمین همراه با زمین لرزه را آشکار کرده (Gens and van Genderen, 1996; Tourani et al., 2021; Fielding et al. 2005) و توانایی ما را در مشاهده فعالیت های تکتونیک فعال بهبود بخشند (Peltzer and Rosen, 1995; Salvi et al., 2012). این روش به عنوان یک روش جایگزین در کنار روشهای لرزه شناسی می تواند اطلاعات مفیدی را از موقعیت، عمق و امتداد گسل مسبب زلزله ارائه کند (Lohman and Simons, 2005; Pedersen et al., 2003). زلزله ۲۹ فروردین سال ۱۴۰۰ بندر گناوه در پیشترفای دگرشکلی زاگرس به عنوات یکی از فعالترین کمربند های لرزه خیز چین و تراست درون قاره ای در دوره کواترنری رخ داده است (Etemad-Saeed et al., 2020) (شکل ۱). عمده دگرشکلی در این پهنه ناشی از توسعه گسلهای تراستی پنهان می باشد که باعث رشد چین خوردگی ها و متعاقب آن افزایش و شدت کوهزایی می شوند (Berberian 1995). هدف اصلی این پژوهش بررسی تغییرات سطحی عمودی همراه با زلزله با استفاده از تصاویر راداری ماهواره سنتینل ۱ و تکنیک تداخل سنجی راداری به منظور بررسی دگرشکلی ناشی از این زلزله در پیش ژرفای زاگرس به عنوان شاهدهی بر ادامه دگرشکلی کواترنری این کمربند می باشد.



شکل ۱: رومرکز زلزله ۲۹ فروردین گناوه از منابع مختلف به همراه پس لرزه ها بر روی نقشه زمین شناسی. نقشه کوچک مقیاس موقعیت منطقه مورد مطالعه را در پیشانی دگرشکلی زاگرس را نشان می دهد.



زمین ناشی و تکتونیک منطقه:

کمر بند کوهزایی زاگرس با جهت پیشرفت دگرشکلی به سمت جنوب غرب، بر اثر فرورانش لیتوسفر اقیانوسی تبتیس جدید از ژوراسیک تا سنوزوییک و متعاقب آن برخورد پلیت عربی به خرده قاره ایران مرکزی از سنوزوییک تا کواترنری شکل گرفته است (Vernant et al., 2004; Khadivi et al. 2010). دگرشکلی این کمر بند را با دو مرحله متوالی دگرشکلی معرفی می شود. فاز ابتدایی شکل پذیر قدیمی تر از ائوسن و فاز دوم که به صورت شکنا-شکل پذیر عمل کرده و از میوسن بالایی شروع شده و حاصل آن گسلهای تراستی، چین خوردگی و گسلهای امتداد لغز می باشد (Ghanbarian and derakhshani 2022). عمده لرزه خیزی کمر بند ساده چین خورده زاگرس ناشی از گسلهای تراستی پنهان است که به ندرت به سطح می رسند (Walker et al. 2005) و عامل کوتاه شدگی سطحی در این کمر بند با ایجاد سری از چینهای موازی می شوند (McQuarrie 2004). یکی از فعالترین گسلهای اصلی زاگرس گسل پیش ژرفای زاگرس (ZFF) با امتداد شمال غرب- جنوب شرق، در حد فاصل کوه و دشت و به صورت پنهان (blind) می باشد که از محدوده مورد مطالعه عبور می کند (شکل ۱) و به عنوان پیش ژرفای دگرشکلی شناخته می شود. این گسل چینهای با رخنمون سنگی سازند های آقاجاری و بختیاری را از رسوبات جوان و آبرفتی کواترنری دشت ساحلی خلیج فارس را از هم جدا می کند (Berberian 1995). گسل پیش ژرفای زاگرس دارای سازوکار رانندگی با مولفه راستبر می باشد. محدوده متاثر از زلزله شامل یک سری از چین های دو سویه، با امتداد شمال غرب- جنوب شرق می باشد. این چینها به صورت نامتقارن با پهلوی با شیب کمتر به سمت شمال شرق و شیب بیشتر به سمت شمال غرب شناخته می شوند. تمام این ویژگی ها نشان دهنده چینهای مرتبط با گسل می باشد. منطقه تحت تاثیر زلزله بر روی تاقدیس دو سویه بلخاری با امتداد شمال غرب- جنوب شرق به عنوان یکی از دگرشکلی های سطحی در پیش ژرفای کمر بند کوهزایی زاگرس قرار گرفته است (سنایی و دیگران ۱۳۹۹).

مشخصات زلزله:

بر اساس اطلاعات سازمان زمین شناسی آمریکا (USGS, 2021) در ساعت ۱۱:۱۱ دقیقه روز یکشنبه ۲۹ فروردین ۱۴۰۰ (April 18, 2021) زلزله ای با بزرگی ۵/۹ در مقیاس Mww در عمق ۸ کیلومتری در شمال غرب بندر گناوه رخ داده است. سازوکار کانونی این زلزله نشان دهنده مکانیسم یک گسل تراستی یا امتداد شمال غرب- جنوب شرق با شیب کم به سمت شمال شرق می باشد (جدول ۱). این زلزله باعث تخریب بیش از ۳۰ روستا در اطراف رومرکز زلزله شده است. مطالعات میدانی توسط یوسفی و فرهنگ (۱۴۰۰) نشان دهنده تغییرات سطحی و تخریب بیشتر در روستاهای واقع در قسمت جنوب غربی و در امتداد سویه شمال غربی تاقدیس بلخاری می باشد.

جدول ۱: مشخصات زلزله گناوه از منابع مختلف.

منبع	بزرگا	عمق (کیلومتر)	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	سازو کار کانونی
USGS	۵/۸ (M _{ww})	۸	۲۹/۷۹۳	۵۰/۶۷۸	
GFZ	۶ (M _w)	۱۰	۲۹/۷۷	۵۰/۶۶	
IIES	۶ (M _L)	۲۰	۲۹/۷۱	۵۰/۷	
EMSC	۵/۸ (M _{ww})	۱۰	۲۹/۸۲	۵۰/۷	
IRSC			۲۹/۷۹۳	۵۰/۶۷۸	

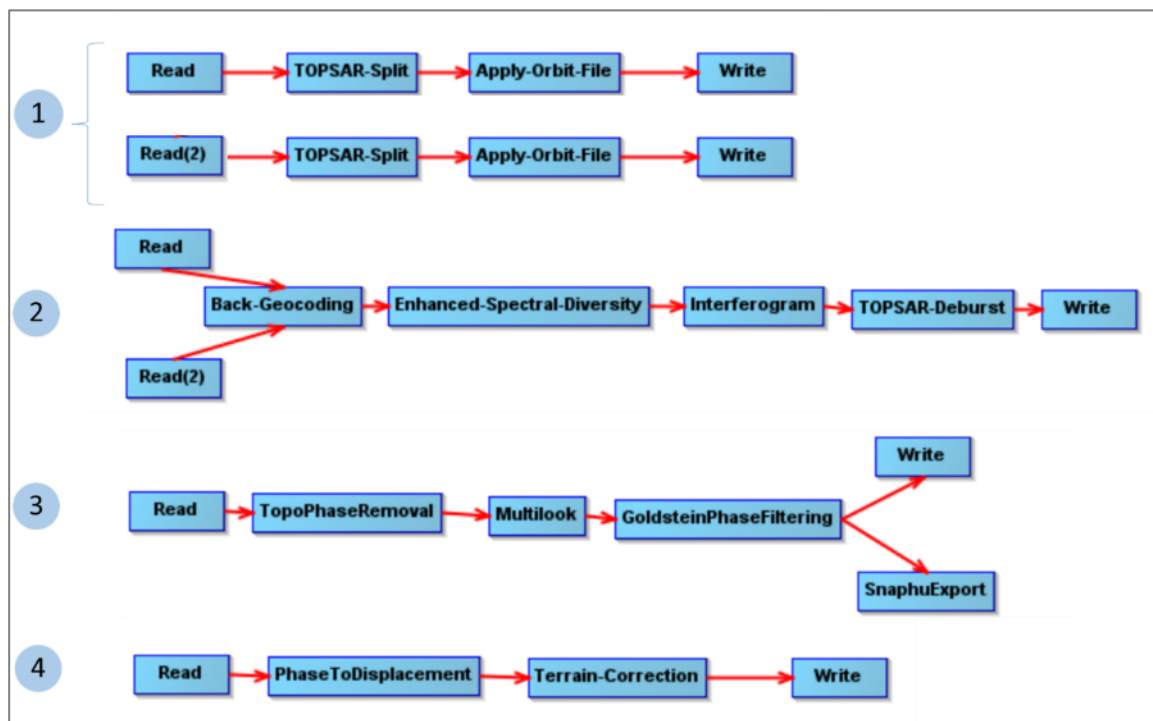
مواد و روش ها:

به منظور محاسبه مقدار جابجایی عمودی در هنگام زمین لرزه، دو تصویر راداری ماهواره سنتینل ۱ باند C با مود IW به تاریخ های ۱۴ و ۲۶ آوریل با مشخصات جدول ۲ متعلق به سازمان فضایی اروپا استفاده شده است (<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1>).

جدول ۲: مشخصات تصاویر راداری مورد استفاده

Mission	Observation date	Pass	Track	Orbit	Product type
Sentinel 1-A	14 April 2021	Ascending	101	37448	SLC
Sentinel 1-A	26 April 2021	Ascending	101	37623	SLC

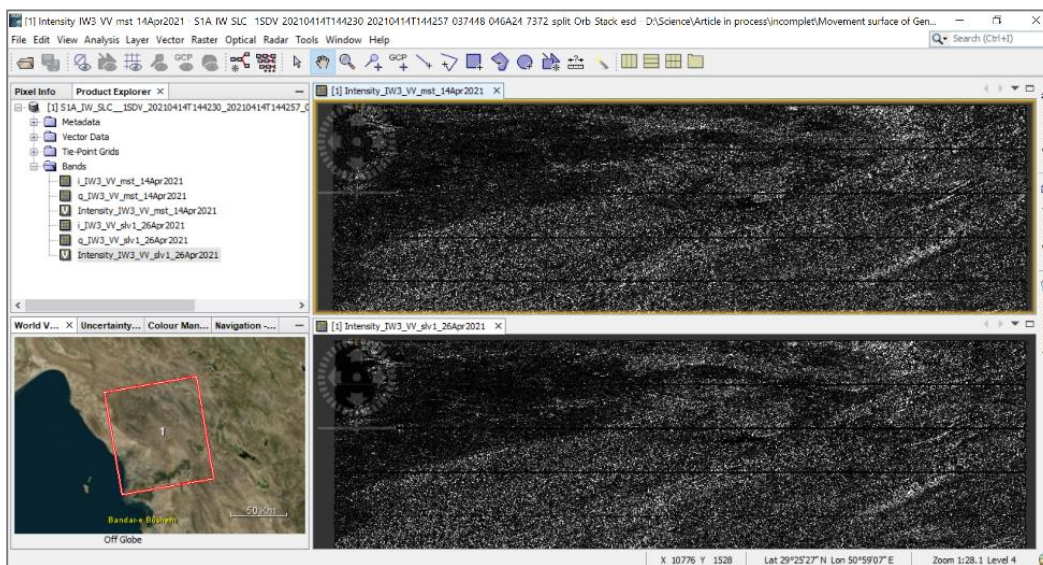
هر تصویر سنتینل ۱ دارای سه IW و هر IW شامل ۹ قسمت (Burst) می باشد. محدوده مورد مطالعه توسط IW3 و قسمت های ۶ تا ۸ تصاویر اخذ شده پوشش داده شده است. فرایند استخراج جابجایی عمودی با استفاده از نرم افزار SNAP (<https://step.esa.int>)، نرم افزار تخصصی داده های سری سنتینل و مطابق با دستورالعمل سازمان فضایی اروپا مطابق شکل ۲ انجام شده است.



شکل ۲: فرایند استخراج جابجایی همراه با زمین لرزه با استفاده از دو تصویر سنتینل ۱ در نرم افزار SNAP

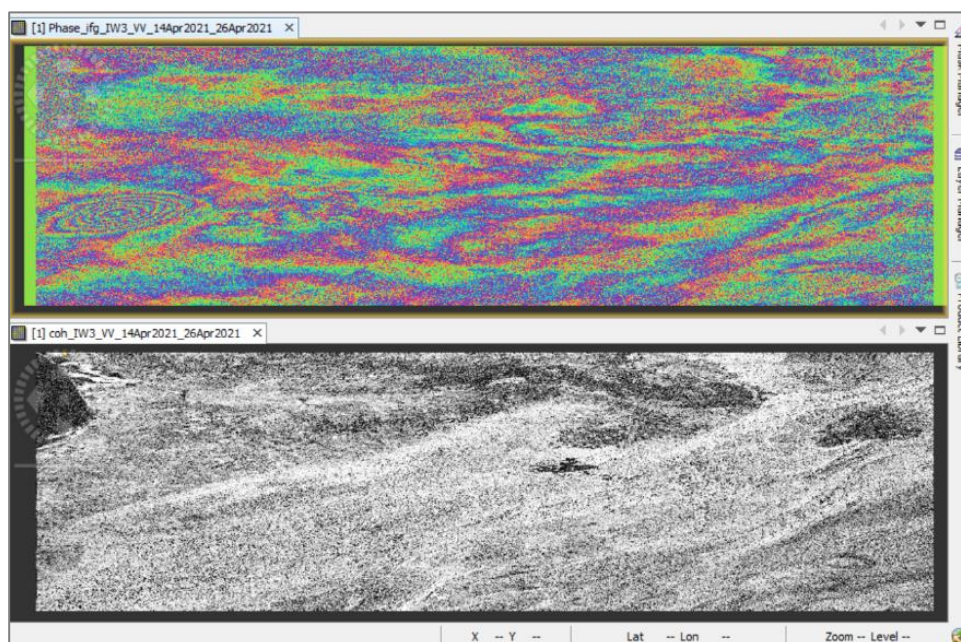
این فرایند شامل چهار مرحله اصلی به شرح زیر می باشد.

مرحله ۱ (پیش پردازش) داده های مداری برای تصاویر تعریف و قسمت های مورد نظر انتخاب گردید. مرحله ۲: در این مرحله دو تصویر به وسیله دستور Geocode با هم در یک دسته قرار گرفته و تصویر ۱۴ آوریل به عنوان تصویر پایه (Master) (تصویری که از لحاظ هندسی و رادیومتریکی به عنوان مبنا در نظر گرفته می شود) و تصویر ۲۶ آوریل به عنوان تصویر پیرو (Slave) (تصویری که از لحاظ رادیومتریکی و هندسی با پایه منتطبق می شود) انتخاب گردید(شکل ۳).



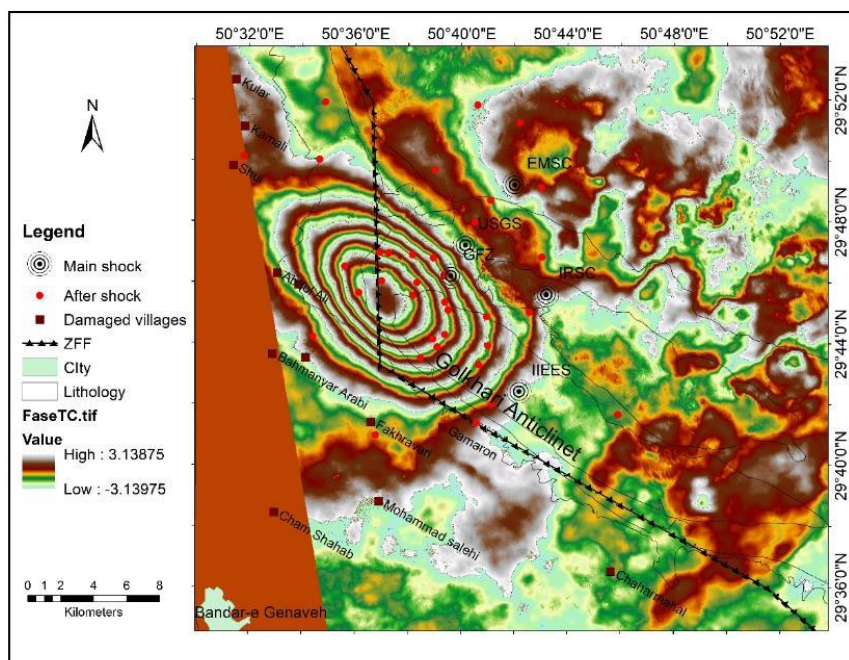
شکل ۳: تصویری از محیط نرم افزار SNAP. تصویر پایه در بالا و تصویر پیرو در پایین نمایش داده شده است.

در گام بعدی اختلاف رادیومتریکی بین دو تصویر از بین می رود. مرحله تداخل سنجی (interferometry) به عنوان گام اصلی، دو تصویر پایه و پیرو با هم ادغام و حاصل آنها دو تصویر فاز (Phase) و کوهرنسی (Coherency) می باشد. تصویر فا نشان دهنده اختلاف پرتوهای ارسالی و دریافتی دو تصویر ورودی، یا اختلاف یک پیکسل با پیکسلهای مجاور و تصویر کوهرنسی نشان دهنده میزان تطابق سیگنالهای تداخل سنجی است. مقدار پیکسلهای تصویر کوهرنسی در بازه ۰- تا ۱ متغیر است. هرچه مقدار پیکسلها به یک نزدیکتر باشد دقت تصویر فاز بیشتر می باشد. خروجی تصویر برای منطقه مورد مطالعه مقادیر پیکسل ۰/۶ تا ۰/۹ را نشان می دهد که قابل قبول می باشد. در انتهای این مرحله خروجی قسمت های مورد استفاده با هم ادغام و یک تصویر پیوسته ایجاد می گردد (شکل ۴).



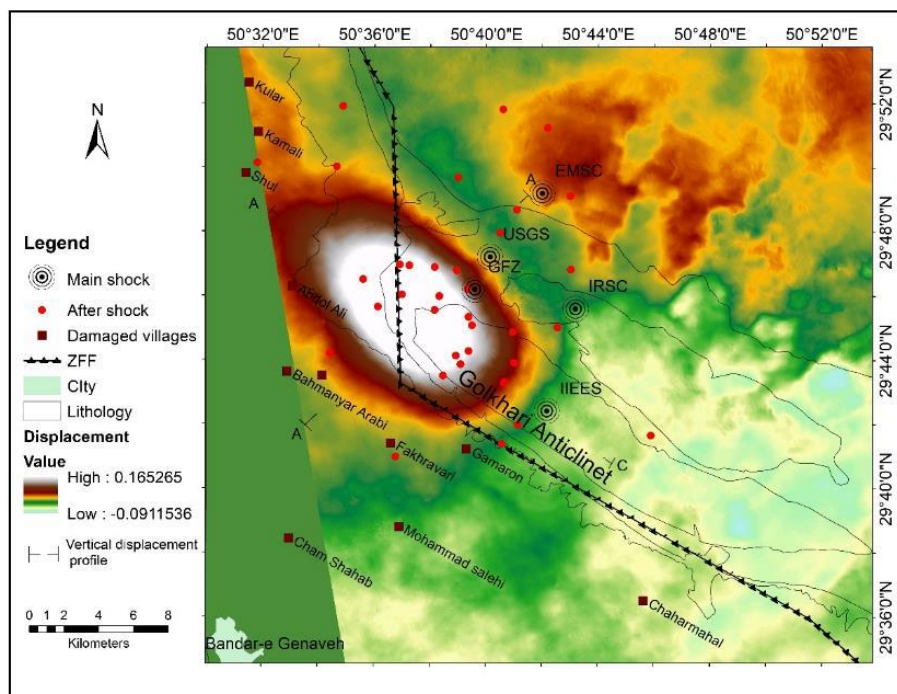
شکل ۴: تصاویر فاز و کوهرنسی که در آن قسمت‌های مجزا با هم ادغام شده است.

مرحله ۳: با توجه به اینکه هدف اصلی تداخل سنجی راداری استخراج اختلاف فاصله ایجاد شده بین زمین و ماهواره در دو تصویر قبل و بعد از زلزله می باشد، باید اثر توپوگرافی به طور کامل حذف گردد. بدین منظور از تصویر رقومی ارتفاعی SRTM 1-sec Grid استفاده شد. سپس برای کاهش نویز بر روی تصویر فاز از دو روش Multilooking و فیلتر Goldenstine استفاده شد. سپس به منظور به دست آوردن تغییرات سطح زمین تصویر فاز به دست آمده توسط افزونه snaphu، بازیابی (unwrap) شد که به خوبی می توان تغییرات سطح زمین را بر روی آن مشاهده کرد (شکل ۵).



شکل ۵: تصویر فاز تصحیح هندسی شده که تداخل نما های ایجاد شده، به خوبی تغییرات سطح زمین را در هنگام زلزله را نشان می دهند.

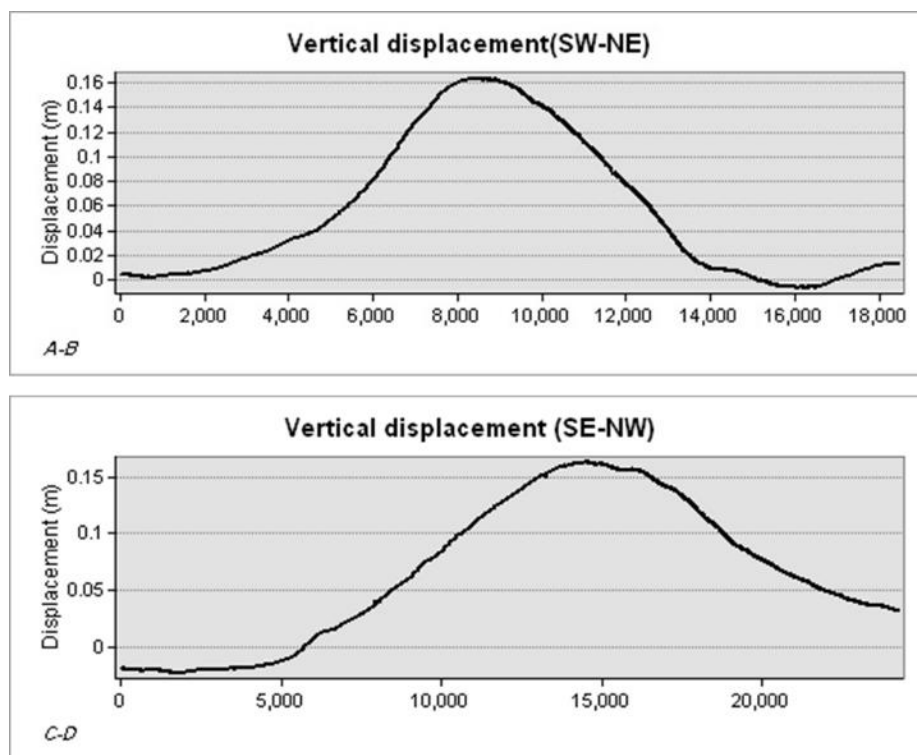
مرحله ۴: در این مرحله تصویر خروجی تبدیل به یک تصویر با مقادیر پیکسل حاوی جابجایی (displacement) گردید و در انتها جهت استفاده از آن در سامانه اطلاعات جغرافیایی تصحیح هندسی بر روی آن صورت گرفت (شکل ۶).



شکل ۶: جابجایی عمودی استخراج شده با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری. رومرکز زلزله اصلی از منابع مختلف، پس لرزه ها و روستاهای دارای بیشترین آسیب بر روی نقشه مشخص شده است.

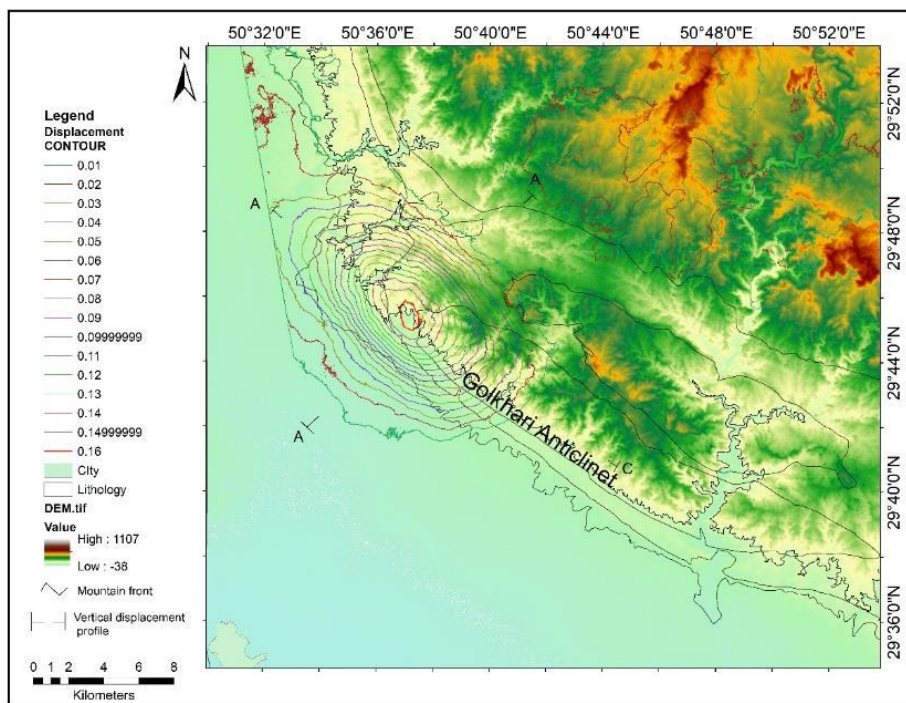
نتایج و بحث:

تصویر خروجی جابجایی قبل و بعد از زلزله نشان دهنده یک تغییرات سطحی با حد اکثر جابجایی عمودی مثبت ۱۶/۵ سانتیمتر و منفی ۰/۹ سانتی متر از ماهواره می باشد. به عبارت دیگر پهنه متأثر از زلزله ۱۶/۵ سانتی متر دچار بالا آمدگی و ۰/۹ سانتی متر دچار فرونشست شده است. این تغییرات سطحی به صورت یک بیضی با امتداد قطر بزرگ شمال غرب- جنوب شرق و به موازات تاقدیس گلخاری و در انتهای سویه شمال غربی آن مشاهده می شود. این بیضی جابجایی دوکی شکل با قسمت کشیده به سمت شمال غرب می باشد (شکل ۶ و ۸). به منظور بررسی تغییرات جابجایی عمودی سطح زمین، در دو امتداد شمال غرب- جنوب شرق و شمال شرق- جنوب غرب به موازات قطرهای بزرگ و کوچک بیضی، دو پروفیل رسم شد (شکل ۸). پروفیل A-B در امتداد قطر کوچک نشان دهنده یک فرونشست جزئی در امتداد شمال شرقی و بالا آمدگی به صورت نامتقارن با شیب کمتر در شمال شرق و شیب بیشتر در قسمت جنوب غربی می باشد. پروفیل C-D که با امتداد جنوب شرق- شمال غرب رسم شده است و نشان دهنده فرونشست جزئی در انتهای جنوب شرقی و بالا آمدگی نامتقارن با شیب بیشتر در قسمت جنوب شرقی و شیب کمتر در قسمت شمال غربی است.



شکل ۷: پروفیل های ارتفاعی به موازات قطر کوچک (A-B) و قطر بزرگ (CD) بیضی جابجایی

با توجه به اینکه بیضی جابجایی قسمتی از دشت و کوهستان را پوشش می دهد برای مقایسه بالا آمدگی در این دو قسمت به ویژه مرز کوه و دشت با استفاده از تصویر DEM ۱۲/۵ متر، مرز دشت و کوه ترسیم را ترسیم کرده و سپس تصویر رستر نشان دهنده مقدار جابجایی عمودی را تبدیل به خطوط کانتوری با دقت ۱ میلی متر کرده و روی تصویر دم پلات شد (شکل ۸). نتیجه آن نشان دهنده، قرار گیری خط کانتوری بیشترین جابجایی، در انتهای سویه شمال غربی تاقدیس بلخاری و در مرز دشت و کوه می باشد (شکل ۸).



شکل ۸: مقایسه خطوط کانتوری بالا آمدگی هنگام زلزله و مرز کوه و دشت

ارتباط رومرکز زلزله و پس لرزه ها با تغییرات سطحی:

در این مطالعه رومرکز به دست آمده توسط سازمان زمین شناسی آمریکا (USGS) به عنوان مبنا در نظر گرفته شده است. این رو مرکز در قسمت شمال شرقی تاقدیس بلخاری و همچنین شمال شرقی بیضی تغییرات سطحی قرار گرفته است. با توجه به مکانیسم گسل و جهت شیب آن که یک گسل تراستی امتداد لغز راستگرد با شیب به سمت شمال شرق می باشد می توان در هنگام زلزله و پاره شدگی گسل یک حرکت بالا آمدگی به سمت جنوب و شمال غرب را برای آن متصور بود. مقایسه رومرکز و پس لرزه های زلزله اصلی با بیضی تغییرات سطحی نیز تراکم آنها را در محدوده بالا آمدگی نشان می دهد.

مقایسه تغییرات سطحی با میزان تخریب سطحی و مناطق مسکونی:

مطالعات میدانی نشان دهنده ریزش گسترده کوه و لغزش توده های خاک و همچنین آسیب به پایه پل ها و جاده ها در محدوده سویه شمال غربی تاقدیس بلخاری می باشد. علاوه بر آن بیشترین آسیب وارده در مناطق مسکونی به ترتیب مربوط به روستای شول، کلر، کمالی، محمدصالحی، عبدالعلی، تاج ملکی و بهمنیاری است (یوسفی و فرهنگ ۱۴۰۰) (شکل ۶ و ۸). این روستا ها در امتداد محور بزرگ بیضی دگرشکلی سطحی قرار گرفته و میزان تخریب به

سمت شمال غرب افزایش پیدا می کند (روستاها ی شول و کلر). به طور کلی این شواهد نشانگر انطباق محدوده بیشترین تخریب با محدوده بیشترین جابجایی عمودی می باشد.

به طور کلی شواهد زیر را می توان گواهی بر پیشرفت دامنه کوهزایی به سمت جنوب غرب و شمال غرب یا به عبارت دیگر رشد تاقدیس بلخاری در جهت سویه شمال غربی و دامنه جنوب غربی و به تبع آن پیشرفت پیش ژرفای زاگرس در این دو جهت ناشی از زلزله گناوه و بر اثر رشد یک گسل تراستی پنهان دانست.

۱- پروفیل های جابجایی نشان دهنده یک فرونشست در قسمت جنوب شرقی و شمال شرقی و در ادامه یک بالا آمدگی نامتقارن با کشیدگی به سمت شمال غرب و جنوب غرب می باشد. این جابجایی را می توان به بالا آمدگی همراه با حرکت راستگرد ناشی از گسل تراستی با پیشرفت دگرشکلی یا پاره شدگی گسل از جنوب شرق به سمت شمال غرب به موازات محور تاقدیس دانست.

۲- بیشترین بالا آمدگی در انتهای سویه شمال غربی تاقدیس رخ داده است که می تواند شاهدی بر پیشرفت این سویه تاقدیس به سمت شمال غرب دانست.

۳- رومرکز زلزله (USGS به عنوان مبنا) در شمال شرق بیضی جابجایی و حتی دیگر مراکز نیز یا در قسمت جنوب شرقی یا شمال شرقی قرار دارند و نشان دهنده نقطه شروع پاره شدگی از این قسمت ها به سمت جنوب و شمال غرب می باشند.

۴- بیشترین تخریب و آسیب دیدگی مربوط به مناطق و روستاهای واقع در در قسمت سویه شمال غربی تاقدیس و در محدوده بیشترین جابجایی سطحی قرار گرفته اند که به خوبی با هم منطبق هستند.

۵- پراکنده گی پس لرزه ها نشان دهنده تمرکز آنها بر روی ناحیه با بیشترین بالا آمدگی است. دیگر پس لرزه ها با تمرکز کمتر به صورت یک هلال از جنوب شرق تا شمال غرب و بر روی دامنه شمال شرقی پراکنده شده اند. این الگوی پس لرزه ها می تواند شاهدی بر وجود گسل اصلی با امتداد شمال غرب- جنوب شرق با شیب به سمت شمال شرق باشد که اثر آن از شمال شرق شروع شده و تا به موازات محور طولی بیضی ادامه یافته است.

۶- تقریباً نیمی از بیضی جابجایی فراتر از مرز کوه و دشت و در قسمت دشت قرار گرفته است که نشان دهنده بالا آمدگی دشت یا به عبارتی الحاق این قسمت ها به پیشانی کوهستان و پیشرفت پیشانی دگرشکلی می باشد.

نتیجه گیری:

فعالیت گسل پیش ژرفای زاگرس در تاریخ ۲۹ فروردین ۱۴۰۰ باعث زلزله ای با بزرگی ۵/۸ در عمق ۸ کیلومتری و شمال غرب بندر گناوه شد. آنالیز تداخل سنجی راداری دو تصویر سنتینل ۱ قبل و بعد از زلزله نشان دهنده یک دگرشکلی سطحی عمودی با شکل بیضی دوکی شکل به موازات تاقدیس بلخاری و با حداکثر بالا آمدگی ۱۶۵ میلی متر در امتداد سویه شمال غربی این تاقدیس و در مرز کوه و دشت است. بررسی و مقایسه بیضی جابجایی با رومرکز، پس لرزه ها، تخریب سطحی و مرز کوه و دشت نشان دهنده بالا آمدگی و پیشرفت مرز کوه به سمت دشت در دو امتداد شمال غرب و جنوب غرب همراه با رشد تاقدیس بلخاری و تأکیدی بر ادامه روند دگرشکلی کواترنری پیشانی زاگرس در این امتداد می باشد.

سپاسگزاری:

این مقاله از حمایت های مالی معاونت پژوهشی دانشگاه سیستان و بلوچستان بهره برده است.

منابع:

- یوسفی، طهمورث.، فرهنگ، آ.، (۱۴۰۰) گزارش زمین لرزه بندر گناوه، استان بوشهر. سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- سنائی، سلمان، یساقی، علی، صدر، امیرحسین، همایی، مجتبی، دریکوند، سمیه. (۱۳۹۹). 'تحلیل ساختاری و اثر سیستم گسلش در مخزن آسماری- چهرم میدان گلخاری'، زمین ساخت، ۴(۱۴)، pp. 29-47. doi: 10.22077/jt.2021.3652.1087
- Fielding, E.J., Talebian, M., Rosen, P.A., Nazari, H., Jackson, J.A., Ghorashi, M. and Walker, R., 2005. Surface ruptures and building damage of the 2003 Bam, Iran earthquake mapped by satellite synthetic aperture radar interferometric correlation. *Journal of Geophysical Research*, 110: B03302.
- Gens, R. ve Vangenderen, J.L., 1996. SAR interferometry-issues, techniques, applications. *International Journal of Remote Sensing*, 17, 1803-1835.
- Tourani, M., Caglayan, A., Saber, R. and Isik, V., 2021. Determination of Land Subsidence in Gorgan Plain with InSAR Method (Golestan, NE Iran). Chitea, F. (Ed), *Geoscience for Society, Education and Environment*, ISBN 978-973-27-3336-3, DOI. 10.5281/zenodo.4322617.
- Vernant, P.; Nilforoushan, F.; Hatzfeld, D.; Abbassi, M.R.; Vigny, C.; Masson, F.; Nankali, H.; Martinod, J.; Ashtiani, A.; Bayer, R.; 2004. Present-day crustal deformation and plate kinematics in the Middle East constrained by GPS measurements in Iran and northern Oman. *Geophys. J. Int.* 157, 381–398.
- Etemad-Saeed, N., Najafi, M., Vergés, J., 2020. Provenance evolution of Oligocene–Pliocene foreland deposits in the Dezful embayment to constrain Central Zagros exhumation history. *Journal of the Geological Society*, 177(4), 799-817.
- Berberian, M., 1995. Master 'blind' thrust faults hidden under the Zagros folds: Active basement tectonics and surface morphotectonics. *Tectonophysics*, 241, 193–224.
- Lohman, R. B., Simons, M. 2005. Locations of selected small earthquakes in the Zagros Mountains. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 6(3). <https://doi.org/10.1029/2004GC000849>
- Pedersen, R., Jónsson, S., Árnadóttir, T., Sigmundsson, F., & Feigl, K. L., 2003. Fault slip distribution of two June 2000 Mw 6.5 earthquakes in South Iceland estimated from joint inversion of

- InSAR and GPS measurements. *Earth and Planetary Science Letters*, 213(3–4), 487–502.
[https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(03\)00302-9](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(03)00302-9)
- Peltzer, G., & Rosen, P. 1995. Surface displacement of the 17 May 1993 Eureka Valley, California, earthquake observed by SAR interferometry. *Science*, 268(5215), 1333–1336.
<https://doi.org/10.1126/science.268.5215.1333>
- Salvi, S., Stramondo, S., Funning, G. J., Ferretti, A., Sarti, F., & Mouratidis, A., 2012. The Sentinel-1 mission for the improvement of the scientific understanding and the operational monitoring of the seismic cycle. *Remote Sensing of Environment*, 120, 164–174. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.09.029>
- Ghanbarian, M. A., & Derakhshani, R., 2022. The folds and faults kinematic association in Zagros. *Scientific Reports*, 12(1), 1-15.
- Walker, R. T., Andalibi, M. J., Gheitanchi, M. R., Jackson, J. A., Karegar, S., & Priestley, K., 2005. Seismological and field observations from the 1990 November 6 Furg (Hormozgan) earthquake: a rare case of surface rupture in the Zagros mountains of Iran. *Geophysical Journal International*, 163(2), 567-579.
- Khadivi, S., Mouthereau, F., Larrasoña, J. C., Vergés, J., Lacombe, O., Khademi, E., ... & Suc, J. P., 2010. Magnetochronology of synorogenic Miocene foreland sediments in the Fars arc of the Zagros Folded Belt (SW Iran). *Basin Research*, 22(6), 918-932.
- McQuarrie, N., 2004. Crustal scale geometry of the Zagros fold–thrust belt, Iran. *Journal of structural Geology*, 26(3), 519-535.