

برآورد میزان جابه‌جایی سطح زمین در اثنای زمین‌لرزه تیرماه ۱۳۹۹ شمال غرب ایران محدوده مورد مطالعه: شهر قطور

راشد امامی^۲

عارف رستمی^۴

ریحانه مدیرزاده^۱

صیاد اصغری سراسکانرود^۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۳/۱۳

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۶/۱۴

چکیده

زمین‌لرزه فاجعه طبیعی و کشنده است که موجب مرگ و زخمی شدن بسیاری از افراد و امواج تسونامی می‌شود. اگرچه یکی از رایج‌ترین پدیده‌های طبیعی است اما توسط بسیاری از مردم به‌عنوان ترسناک‌ترین و خطرناک‌ترین مخاطره در نظر گرفته می‌شود. در حال حاضر با پیشرفت سنجش‌ازدور، تداخل‌سنجی راداری به‌عنوان روشی کارآمد و نسبتاً دقیق در اندازه‌گیری جابه‌جایی سطح زمین است. بررسی موردی بر روی زلزله ۵ تیرماه سال ۱۳۹۹ در شهر قطور از توابع شهرستان خوی صورت گرفته است. در این مطالعه از فن InSAR و PSI برای برآورد مقدار جابه‌جایی به‌وجود آمده از زلزله استفاده شد و تصاویر در عبورهای بالارو مورد بررسی قرار گرفتند و با استفاده از نرم‌افزار Sarproz^۵ پردازش شد. فن تداخل‌سنجی راداری^۶ و روش‌های پیشرفته‌تر مانند PSI اجازه می‌دهند جابه‌جایی‌های عمودی سطح زمین در حد میلی‌متر تشخیص داده شود. در این راستا زوج تصاویر موجود با همبستگی خوب از داده‌های سنتینل-۱^۷ مرتبط با منطقه انتخاب و به‌کارگرفته شده‌اند. هدف از این تحقیق برآورد میزان بالآآمدگی و فروافتادگی سطح زمین ناشی از زلزله است. پردازش روی تصاویر انتخابی مربوط به دوره‌های قبل و بعد از تاریخ زلزله انجام شد که خروجی‌های موردنظر به‌صورت اشکال و نمودار بوده است. نمودارها صحت کار و میزان جابه‌جایی تجمعی سالانه را نشان می‌دهند. نتایج تحقیق نشان داد که میزان جابه‌جایی سطح زمین بین ۱۶- و ۱۶+ بوده است. بیشترین فرورفتگی و بالآآمدگی به‌ترتیب مربوط به نواحی شمال‌شرقی (روستای گوگرد) و نواحی جنوبی منطقه (روستاهای کوتان‌آباد، میرعمر، گرناویک) است. در راستای بیشینه مقدار جابه‌جایی‌ها (بالآآمدگی و فروافتادگی) داده‌های به‌دست‌آمده از زلزله، نشان می‌دهد که گسل باشکالا به‌عنوان یک گسل چپ‌گرد موجب رخداد این زلزله بوده است.

واژه‌های کلیدی: جابه‌جایی سطح زمین، قطور، زلزله، InSAR، Sentinel1A، Sarproz

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشگاه محقق اردبیلی. (نویسنده مسئول) modiri 4710@gmail.com

۲- دانش آموخته کارشناسی ارشد سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشگاه محقق اردبیلی rashed.pr.71@gmail.com

۳- دانشیار دانشکده ادبیات و علوم انسانی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی s.asghari@uma.ac.ir

۴- دانش آموخته کارشناسی ارشد سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشگاه محقق اردبیلی A-rostami@yahoo.com

5- SAR PROcessing tool by periz

6- InSAR

7- Sentinel1

مقدمه

در ۲۴ فوریه ۱۹۰۰ اتفاق افتاده با ۵/۱۱ ریشتر که در امتداد گسل جنوبی قطور، باعث خسارت شدید به روستاهای اطراف شد (طرح جامع قطور، ۱۳۹۲).

شریفی کیا (۱۳۸۹)، در تحقیقی به بررسی و تحلیل تغییرات سطحی پوسته زمین حاصل از پدیده زلزله به کمک تکنیک‌های سنجش‌ازدوری در سال‌های اخیر پرداختند که این تحقیق مربوط به زلزله بم دی‌ماه ۱۳۸۲ و زلزله فیروزآباد کجور بوده است. به این منظور داده‌های سنجش از دور انفعالی حاصل از سکوی ماهواره‌ای IRS و سنجنده‌های LISS III & Pan برای مطالعه زلزله فیروزآباد کجور و داده‌های سنجش از دور فعال حاصل از سکوی ماهواره‌ای ENVISAT و سنجنده راداری SAR را مورد استفاده و تجزیه و تحلیل قرار دادند که نتایج تحقیق نشان داد تغییرات سطحی پوسته زمین از نوع بازشدگی حاصل از فعالیت یک گسل پنهان در منطقه فیروزآباد کجور است. در منطقه بم نیز شناسایی یک گسل جدید (گسل اصلی و مسبب زلزله) تعیین روند نرخ جابه‌جایی پوسته زمین در حین وقوع زلزله، تغییرات مرفولوژیکی که حاصل از ایجاد سنگ افت^۲ بوده است را نشان داد.

شریفی کیا و همکاران (۱۳۹۵)، به تولید نقشه سیاهه زمین‌لغزش‌های فعال مبتنی بر تکنیک تداخل‌سنجی راداری در جنوب شهرستان چالوس در بازه زمانی ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۰ پرداخته‌اند. در این تحقیق دو سنجنده مختلف ASAR و PALSAR به ترتیب در باند C و L مورد استفاده قرار گرفت. از تصاویر ASAR حدوداً ۱۸ زمین‌لغزش و از PALSAR حدوداً ۱۱۰ زمین‌لغزش به ثبت رسید؛ در نهایت نقشه خروجی از تکنیک تداخل‌سنجی تفاضلی راداری از طریق مطالعات میدانی و همچنین نقشه سیاهه زمین‌لغزش حاصل از پژوهش پژوهشگران پیشین مورد ارزیابی و اعتبارسنجی قرار گرفت. نتایج حاصل نشان داد که تکنیک تداخل‌سنجی تفاضلی راداری به واسطه حساسیت سیگنال راداری به جابه‌جایی‌های سطح زمین در تولید نقشه‌های سیاهه زمین‌لغزش‌های

زمین‌لرزه‌ها یکی از مخرب‌ترین رویدادهای طبیعی ناشی از خود زمین هستند که در اثر جابه‌جایی قطعات گسلی ایجاد می‌شوند، همچنین یک حرکت پوسته‌ای است که به صورت ناگهانی و سریع ایجاد شده و می‌تواند باعث تلفات جانی و مالی شوند (Kaya et al, 2017). به همان نسبت که شهرنشینی توسعه پیدا می‌کند و جمعیت افزایش می‌یابد میزان تلفات انسانی هم افزایش پیدا می‌کند و امروزه تکنیک‌های سنجش‌ازدور پتانسیل زیادی در شناسایی مناطق آسیب‌دیده ناشی از زمین‌لرزه‌ها و در هدایت عملیات امداد و نجات در زلزله‌های اخیر نشان داده‌اند (Kaplan et al, 2022). ایران طی چند سال اخیر با بحران زمین‌لرزه روبه‌رو بوده است؛ زلزله‌های پیاپی همراه پس‌لرزه‌های آن، باعث به وجود آمدن بالاآمدگی و فروافتادگی‌ها شده است.

در ۵ تیر ۱۳۹۹ زمین‌لرزه ۵/۳ ریشتری در شمال غربی ایران در شهر قطور واقع در استان آذربایجان غربی مرز ایران و ۳۵ کیلومتری وان^۱ ترکیه رخداد، این واقعه در اکثر مناطق استان آذربایجان غربی، در روستاهای کشور ترکیه کاملاً احساس شد که باعث زخمی شدن چندین نفر در روستای اطراف شهر سارای^۲ ترکیه شد و خسارات گسترده‌ای به روستاهای اطراف وارد کرد. طی روزهای قبل و بعد بیش از چندین پس‌لرزه و پیش‌لرزه بین ۲/۵ تا ۴/۸ ریشتر که توسط مرکز زلزله‌نگاری ژئوفیزیک دانشگاه تهران ضبط شده بود جریان اصلی این زمین‌لرزه را به دنبال داشت. اگرچه در سال‌های گذشته هیچ زمین‌لرزه‌ای با شدت متوسط از این شهر زلزله‌زده خارج نشده است اما یک تغییر شکل گسترده فعال و لرزه‌نگاری متعاقب آن شهر را مورد توجه قرار داده و از زمان‌های بسیار قدیم خطر جدی برای شهرها و روستاها به وجود آورده است (علیخان‌زاده، ۱۳۹۹).

همان‌طور که توسط بسیاری از سازه‌های تاریخی، زمین‌لرزه با بزرگی بالاتر از ۶/۰ ریشتر نشان داده شده است به‌ویژه یکی از شدیدترین رویدادهای لرزه‌نگاری تاریخی

1- Van

2- Saray

گورابی و همکاران (۱۳۹۹)، در تحقیقی به کمی‌سازی زمین‌لغزش بزرگ مله کبود ناشی زمین‌لرزه ۷/۳ سال ۱۳۹۶ کرمانشاه با استفاده از اینترفرومتری پرداختند. در این راستا هفت زوج تصویر اینترفرومتریک موجود با همبستگی خوب از داده‌های تصاویر سنتینل ۱ و ۲ مرتبط با منطقه کوهستانی زاگرس شمال‌غرب انتخاب و به‌کارگرفته شده‌اند. الگوی فضایی حرکت توده نشان می‌دهد که زمین‌لغزش مله کبود با طول لغزشی ۳۵۷۰ متر در امتداد جهت NW-SE و با حدود ۲۳۰۰-۱۵۰۰ متر در راستای عمود بر ستیغ کوهستان، به شکلی همگرا و جانب مرکز نسبت به محیط زمین‌لغزش رخ داده است. ارزیابی‌های کمی نشان می‌دهند که مساحت و حجم منطقه متأثر از حرکت توده زمین‌لغزش به ۶/۰ کیلومترمربع (۵۷۷ هکتار) با حجمی حدود ۵۰۰ میلیون مترمکعب می‌رسد. بررسی‌های مقایسه‌ای بیانگر آن است که زمین‌لغزش مله کبود بزرگ‌ترین زمین‌لغزش چند سده گذشته ایران است.

(Li et al, ۲۰۲۰) برای تخمین منبع زلزله و پیامدهای بعد از زلزله ۶/۴ ریشتر منطقه میدانوا در سال ۲۰۱۹ در فیلیپین پژوهشی با استفاده از داده‌های Sentinel 1 و با یک استراتژی وارونگی دوبرحله‌ای انجام دادند. در این مطالعه از داده‌های Sentinel 1 و InSAR برای تولید زمینه‌های تغییر شکل دگرگونی ناشی از چهار زمین‌لرزه بزرگ استفاده شده است. سپس راه‌حل‌های مکانیسم کانونی برای چهار زمین‌لرزه بزرگ با روش PSO^۲ موردبررسی قرار گرفت، مدل بهینه نشان می‌دهد توالی زلزله ناشی از فعال شدن مجدد یک ساختار گسل مزدوج است که شامل دو گسل در سمت چپ تقریباً عمودی و دو گسل سمت راست با زاویه بالا است. نتایج نشان می‌دهد که شکل‌گیری این ساختار مزدوج عمدتاً به دلیل حرکت به سمت غرب صفحه فرورانش دریای فیلیپین است که زمینه را برای زلزله‌های بعدی فراهم می‌کند و به درک بهتر مکانیسم‌های شکل‌گیری و پیامدهای لرزه‌نگاری ساختار مزدوج کمک می‌کند.

فعال نسبت به سایر فنون و روش‌های نوین موفق‌تر عمل کرده است.

احمدزاده و همکاران (۱۳۹۵)، در مقاله‌ای به پایش تغییرات سطحی در بستر سکونتگاه‌ها با استفاده از تداخل‌سنجی InSAR در شهر قطور پرداختند. در این پژوهش ۲۵ تصویر سنجنده ASAR رادار ENVISAT از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ با هندسه‌ی تصویربرداری نزولی در مدار ۳۶۴ با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی پراکنش‌کننده‌ی دائمی PSI و الگوریتم StaMPS و SBAS در تکنیک InSAR^۱ برای مانیتورینگ و رفتارسنجی زمین‌لغزش‌های شهر قطور استفاده شده است. نتایج به‌دست‌آمده از رفتارسنجی دامنه‌های لغزشی شهر قطور به روش تداخل‌سنجی تصاویر ماهواره‌ای، حاکی از وجود جابه‌جایی این دامنه‌ها در راستای دید ماهواره و ناپایداری آن طی سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ می‌باشد. متوسط نرخ جابه‌جایی سطح زمین در راستای دید سنجنده در این مکان بین ۸/۳۱ تا ۲۹- میلی‌متر در سال می‌باشد. لذا در این شهر لغزش‌ها فعال هستند و ممکن است لغزش‌های جدیدی نیز با بزرگی قابل‌ملاحظه‌ای به وقوع بپیوندند.

گورابی و همکاران (۱۳۹۷)، در پژوهشی برای تعیین حدود زمین‌لغزش لرزه‌ای به کمک تکنیک اینترفرومتری در منطقه مله کبود ناشی از زمین‌لرزه ۱۲ نوامبر کرمانشاه را مورد پردازش قرار دادند. در این پژوهش با استفاده از داده‌های راداری سنتینل-۱ و تکنیک InSAR حدود و ثغور زمین‌لغزش مله کبود با استفاده از تکنیک اینترفرومتری، نواحی متأثر از زمین‌لغزش، حتی نواحی صعب‌العبور به‌طور دقیق مشخص شده‌اند. نتایج تحقیق بیانگر پتانسیل ایجاد زمین‌لرزه‌هایی با بزرگای ۷/۳ در شعاع ۳۰ کیلومتری بر روی دامنه‌های نه‌چندان پرشیب در وسعتی حدود ۶ کیلومترمربع (۵۸۰ هکتار) با حجم تقریبی ۴۵۰ میلیون مترمکعب است. علاوه براین، بررسی‌های میدانی منطقه بیانگر وقوع زمین‌لغزش‌های قدیمی در درون زمین‌لغزش مله کبود هستند.

نتایج به دست آمده از تداخل سنجی با فن تراز یابی دقیق نشان داد که فن DInSAR از دقت مکانی زیادی برای کشف بردارهای جابه جایی برخوردار است.

مقصودی و همکاران (۱۳۹۸)، به بررسی رفتار فرونشست زمین در منطقه غرب تهران با استفاده از تصاویر سنتینل-۱ و تداخل سنجی مبتنی بر پراکنشگرهای دائمی پرداختند که در این مقاله یک سری زمانی دو ساله شامل ۳۰ تصویر سنجنده سنتینل-۱، با استفاده از روش تداخل سنجی مبتنی بر پراکنشگرهای دائمی در دو ناحیه مطالعاتی مورد پردازش قرار گرفته است. نتایج، جابه جایی سالانه ۱۱ سانتی متری در جنوب منطقه مورد مطالعه را نشان می دهد. ارزیابی نسبی نتایج در منطقه اول با استفاده از داده های مسیر پایین گذر ۳۱ انجام گرفت که مشخص شد با توجه به اختلاف ناچیز برآورد دو مسیر ۷۹ و ۳۱ نواحی مذکور جابه جایی افقی بسیار کمی داشته و عمده بردار جابه جایی را حرکت قائم تشکیل می دهد.

هدف از این تحقیق برآورد میزان بالآمدگی و فروافتادگی سطح زمین با استفاده از تصاویر راداری سنتینل-۱ مربوط به دوره های قبل (۲۰۲۰/۰۶/۱۶) و بعد (۲۰۲۰/۰۶/۲۸) از تاریخ رخداد زلزله با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری است که زوج تصاویر راداری سنتینل ۱ در عبورهای بالارو با استفاده از نرم افزار Sarproz در محیط ویندوز مورد پردازش قرار گرفت. نتایج تحقیق نشان داد میزان فرونشست و بالآمدگی سطح زمین بین ۱۶- و ۱۶+ بوده است. همچنین مختصات کانون زلزله شناسایی شده با تصاویر راداری با مختصات ثبت شده به وسیله مرکز زلزله نگاری ژئوفیزیک دانشگاه تهران مشابه بوده است.

منطقه مطالعاتی

منطقه مورد مطالعه در این تحقیق شهر قطور است که بر روی نقشه ایران در مختصات: ۴۷۲۴/ ۳۸ درجه شمالی و ۴۴/۴۰۸۴ درجه شرقی قرار دارد. قطور شهری واقع در استان آذربایجان غربی ایران است. این شهر در فاصله ۷۰

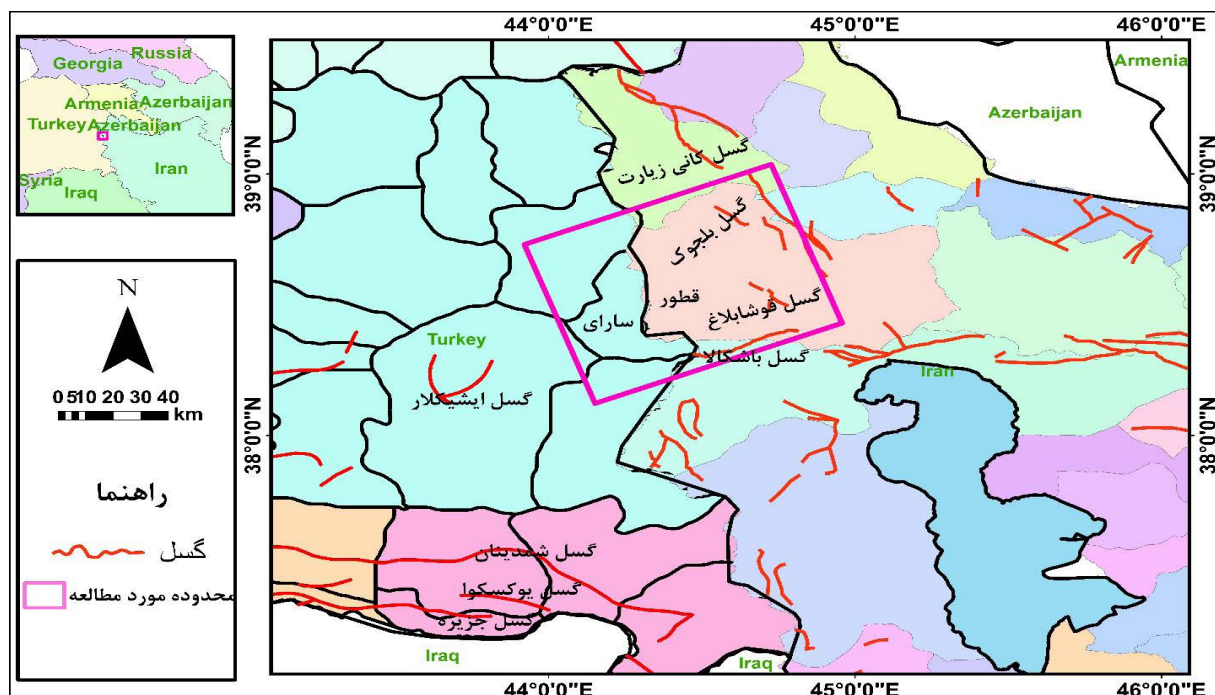
Roquea et all (2014)، به تجزیه و تحلیل جابه جایی بر اثر زلزله سال ۱۷۵۵ با استفاده از PS-InSAR در مرکز شهر لیسبون که خواص ژئومورفولوژیکی منحصربه فردی دارد پرداخته است. این زلزله منطقه را مستعد بی ثباتی زمین کرده است. در این تحقیق سرعت جابه جایی محاسبه شده با مواردی که از عملیات تراز کردن در نرم افزار Sarproz^۱ به دست آمده بود مورد مقایسه قرار گرفت؛ و دلایل احتمالی جابه جایی در این تحقیق ارائه شده است. نتایج نشان داده که علاوه بر یک روند فرونشست از ۹/۷- میلی متر تا ۵/۹ میلی متر در سال و تراکم خاک، یک رفتار فصلی نیز تشخیص داده شد که احتمالاً مربوط به شارژ سفره های آبی یا جزر و مد دریایی است. همچنین توافق خوبی بین PS-InSAR و نظر سنجی های سطح بندی یافت شده که میانگین تفاوت بین دو روش ۱ میلی متر در سال برای مقادیر انسجام بالاتر از ۰/۸۷ است.

دیده بان و همکاران (۱۳۹۶)، به برآورد میزان جابه جایی سطح زمین در اثر زلزله ۶ ریشتری در استان خراسان رضوی پرداختند در این تحقیق، با استفاده از دو فریم تصاویر Sentinel1 مربوط به دوره های قبل و بعد از تاریخ زلزله ۱۳۹۶/۰۱/۱۶ در منطقه سفید سنگ خراسان رضوی از طریق تداخل سنجی اندازه گیری اختلاف فاز پیکسل های هم جوار با استفاده از دو تصویر، اقدام به برآورد میزان جابه جایی سطح زمین و شناسایی کانون زلزله کردند. نتایج تحقیق نشان داد که میزان جابه جایی سطح زمین بین ۰/۲۴- تا ۰/۱۲۸ متر در نوسان بوده است.

واجدیان و همکاران (۱۳۹۰)، به استخراج میدان جابه جایی سه بعدی با استفاده از تداخل سنجی بر روی گسل بم پرداختند. در این تحقیق تصاویر راداری پیش لرزه ای و هم لرزه ای ماهواره Envisat در عبورهای بالارو و پایین رو مورد بررسی قرار گرفت و تصاویر با استفاده از نرم افزار DORIS^۲ پردازش شد. در پایان بازسازی میدان جابه جایی با نرم افزار Matlab صورت پذیرفت. ارزیابی

1- The SAR Processing tool by PeriZ

2- Delft object-oriented Radar Interferometric Software



نگاره ۱: موقعیت محدوده مورد مطالعه

از جمله گسل‌های موجود در شهر مورد مطالعه می‌باشند که مهم‌ترین آن‌ها در زیر مختصراً توضیح داده شده‌اند. **گسل رورانده بلجوک:** این گسل رورانده شمال غرب - جنوب شرق از کشور ترکیه شروع شده تا شمال شهر قطور ادامه دارد. طول این گسل در محدوده مورد مطالعه ۷/۵ کیلومتر است و باعث راندگی آهک‌های سازند روته (پرمن) بر روی کنگولومرای اولیگوسن شده است. **گسل قوشابلاغ:** این گسل ادامه گسل بزرگ قوشابلاغ - قریس در شرق شهر قطور می‌باشد. با امتداد شمالی جنوبی به طول ۴ کیلومتر در این شهر کشیده شده و موجب رانده شدن سنگ‌های آهکی کرتاسه روی ماسه‌سنگ اتوسن و همچنین، موجب ایجاد یک برجستگی میان دو رودخانه شده است.

گسل استران: امتداد این گسل از غرب روستای بابکان تا جنوب روستای استران شرقی غربی می‌باشد سپس به سمت شمال امتداد شمال غرب - جنوب شرق پیدا می‌کند موجب بالا آمدن گدازه‌های بازیک کرتاسه در کنار ماسه‌سنگ اتوسن شده است.

کیلومتری غرب شهرستان خوی قرار دارد. در مسیر خوی به قطور باید از کوهستان‌های پر پیچ‌وخم که دارای مناظر طبیعی بکری هستند، گذر کرد. این شهر در مرز ایران و ترکیه بوده و نزدیک‌ترین شهر به مرز ترکیه است. از شهر قطور تا وان ترکیه ۸۸ کیلومتر فاصله است. شهر قطور، از دیرباز در مسیر تجاری غرب به شرق بوده تا جایی که یکی از شاخه‌های راه ابریشم از این شهر می‌گذشت. چنین موقعیت تجاری موجب شد تا ایران و ترکیه بازارچه و پایانه مرزی رازی را به‌طور رسمی افتتاح کنند و این امر زمینه گسترش رفت‌وآمد اتباع دو کشور و نیز مبادلات تجاری را هرچه بیشتر فراهم کرد. موقعیت منطقه مورد مطالعه در نگاره ۱ ارائه شده است.

ایران در کمربند زلزله واقع شده است. در برنامه‌ریزی توسعه‌ای باید گسل‌ها و نقاط زلزله‌خیز شناسایی شوند. گسل‌های ناحیه به‌عنوان چشمه‌های لرزه‌ای و تسریع‌کننده رخداد زمین‌لرزه از اهمیت بالایی برخوردار هستند. گسل قوشابلاغ، گسل هندوان، گسل راندگی بالابان، گسل کوه اورین، گسل گوگرد، گسل شمال گوگرد، گسل کانی زیارت

جدول ۱: نوع تصویر استفاده شده راداری ماهواره SentinelA1

تاریخ اخذ تصاویر	نوع فرمت	سطح پردازش داده	قدرت تفکیک مکانی	باند های تصویربرداری
۲۰۲۰/۰۶/۱۶ (تصویر پایه)	IW	SLC	IW, 5 m x 20 m	C-SAR
۲۰۲۰/۰۶/۲۸ (تصویر پیرو)	IW	SLC	IW, 5 m x 20 m	C-SAR

مراحل پردازشی تداخل سنجی راداری در نرم افزار Sarproz رادار روش های جدیدی برای اندازه گیری تغییرات سطح زمین با دقت چند میلی متر فراهم کرده است (Fryksten et all, 2019). سازمان فضایی اروپا^۴ با راه اندازی Sentinel-1 باعث شد که تکنیک (InSAR) توانایی خود را در ارائه اندازه گیری تغییرات شکل زمین در مقیاس میلی متر در طول زمان ثابت کند (Tong et all, 2020).

PS-InSAR^۵ یک روش پردازش InSAR است که از چندین تصویر گرفته شده در فواصل منظم برای دستیابی به نتایج بهتر اندازه گیری استفاده می کند. در این مقاله از روش تداخل سنجی راداری برای تعیین تغییر شکل استفاده شده است و ابزاری مناسب برای نظارت بر تغییرات توپوگرافی در مناطق بزرگ و برای مدت زمان طولانی با دقت بالا از چند میلی متر تا سانتی متر است. استفاده از نرم افزار Sarproz که یک نرم افزار قدرتمند و محبوبی است، طیف گسترده ای از دریچه ی مصنوعی^۶ و تکنیک های پردازش InSAR چند محتوا را پیاده سازی می کند (Jácome et all, 2020). در این منطقه در هر کیلومتر مربع از تصاویر سنتینل در باند C برای تعیین تغییر شکل و جابه جایی انباشته شده در یک بازه زمانی ۲۰۲۰ استفاده شد.

اولین مرحله از مراحل پردازشی تداخل سنجی، انتخاب تصاویر مناسب است که مجموعه تصاویر استفاده شده در این تحقیق در جدول ۱ شرح داده شده اند. پس از این مرحله دو تصویر راداری (SLC)^۷ وارد نرم افزار Sarproz شد. در نرم افزار Sarproz، یک تحلیل PSI^۸ با مجموعه داده های

گسل کانی زیارت: با امتداد شمال غرب - جنوب شرق ارتفاعات کانی زیارت را به طول ۱۰ کیلومتر در شمال غرب شهر قطور به وجود آورده است و به صورت یک گسل فعال در دوره پلیوکواترنر در تظاهر سنگ های آتشفشانی مشارکت داشته است (احمدزاده و همکاران، ۱۳۹۳).

گسل باشکالا: با طول ۷۵ کیلومتر در بخش میانی فلات آناتولی ایران در پهنه های گسلی گیلاتوسیة چشمه خوی و چالدران قرار دارد که هم راستا با سامانه گسلی شرق آناتولی با سازوکار غالب چپ گرد پتانسیل لرزه ای بالایی داشته است و نقش مؤثری در سازه های ساختاری منطقه ایفا می کند (Selçuk et all, 2016).

مواد و روش ها

در مطالعه حاضر داده های راداری به دست آمده از ماهواره تصویربرداری سنتینل-۱^۱ برای بررسی زلزله شهر قطور در اختیار مجامع علمی و تحقیقاتی قرار گرفت. برای انجام این تحقیق در ابتدا اطلاعات مربوط به موقعیت زلزله اخذ شد و سپس دو تصویر راداری بعد و قبل از تاریخ رخداد زلزله از سازمان فضایی اروپا گرفته شد. تصاویر تهیه شده دارای حداقل خط مبنا می باشد چون هر چه فاصله زمانی بین دو تصویر کمتر باشد تغییرات جابه جایی سطح زمین را بهتر نمایش می دهد. تصویر قبل زلزله و بعد زلزله را به ترتیب تصویر پایه^۲ و تصویر پیرو^۳ می نامند. اطلاعات مربوط به تصاویر در جدول ۱ ارائه شده است. همچنین پردازش ها از طریق نرم افزار راداری Sarproz انجام شد که مراحل انجام این پژوهش در نگاره شماره ۲ مشاهده می شود.

4- ESA

5- persistent Scatter InSAR

6- SAR

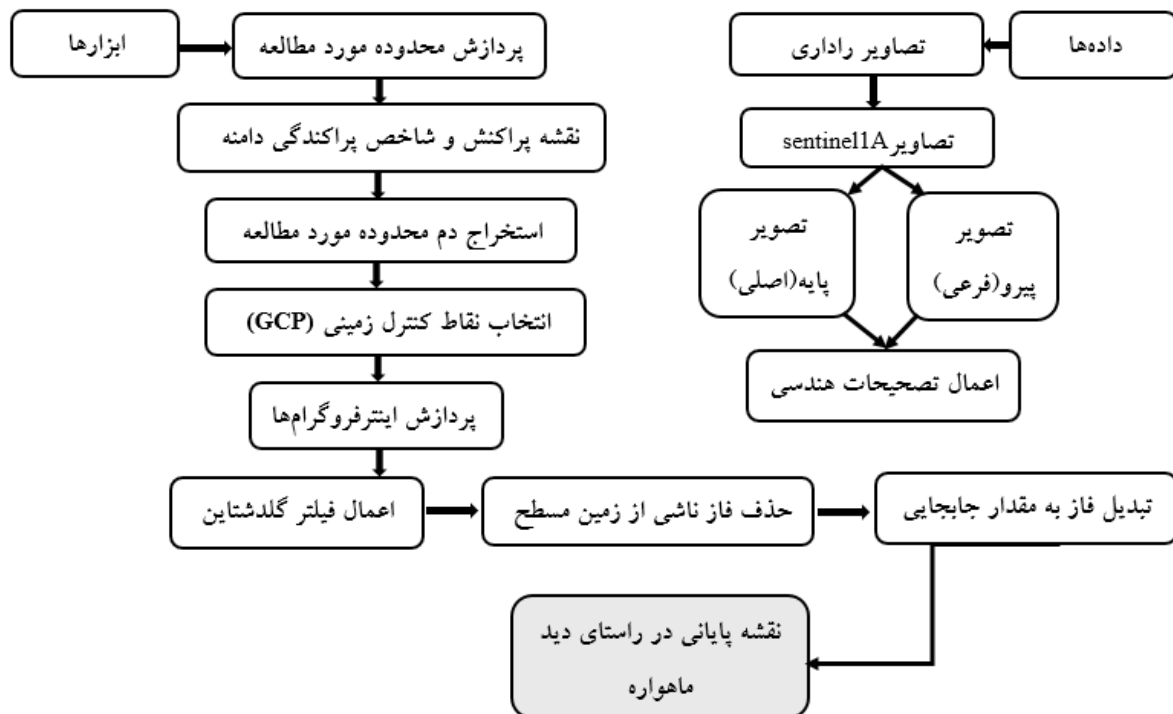
7- Single-look Complex

8- Persistent Scatterers InSAR

1- Sentinel-1

2-master

3- slave



نگاره ۲: فلوچارت روش تحقیق

صعودی انجام گرفت. PSI تغییر شکل سطح را طی ماه‌ها یا سال‌ها اندازه‌گیری می‌کند و اثرات جو، توپوگرافی و نویز سیگنال را از بین می‌برد. همچنین از تداخل‌ها با یک صحنه اصلی استفاده می‌کند. در این روش، فقط پیکسل‌های منسجم با فاز یا دامنه پایدار پردازش می‌شوند (Farova et al, 2019). این نرم‌افزار به‌طور خودکار مدارهای دقیق برای هر تصویر را بارگیری کرده و مدل (Srtm) را با وضوح بالا به‌عنوان مدل رقومی ارتفاع^۱ تبدیل کرده است. تصویر اصلی در هر تجزیه و تحلیل به‌طور خودکار توسط نرم‌افزار انتخاب شد. آب‌وهوا در تاریخ تصاویر انتخاب شده در مشاهدات آب و هوایی^۲ کنترل شد تا مشاهده شود که هیچ بارندگی یا پوششی از برف برای تاریخ‌های انتخاب شده وجود ندارد (Antonio et al, 2018).

در مراحل بعدی انتخاب نقاط کنترل زمینی (GCP) انجام گرفت. مجموعه داده‌ها به‌صورت دستی از طریق یک نقطه

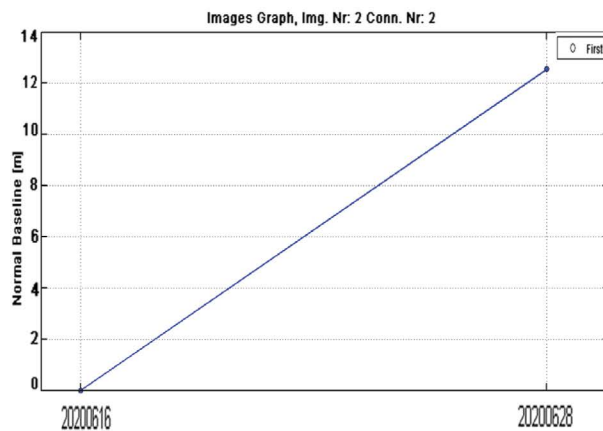
کنترل زمینی (GCP) انتخاب می‌شوند که می‌تواند در هر دو نقشه توسط Sarproz تولید شده و در هر دو تصاویر ماهواره‌ای موردنظر، شناسایی شود و در این حالت، از Google Earth استفاده شد. مؤلفه فاز اتمسفر (PSC)^۳ بر اساس شاخص پایداری دامنه (ASI) انتخاب شدند و با مقدار آستانه ۰/۸ محاسبه شده که در برآورد مؤلفه فاز اتمسفر، جابه‌جایی برای همه نقاط خطی تعیین شده است. فیلتر فاز (APS) با استفاده از PS-InSAR، روشی است که از همبستگی مکانی و زمانی برای پایش تغییرات، توسط تداخل‌سنجی راداری اجرا می‌شود. هنگامی که APS برآورد شد پس از حذف آن، می‌توان نقاط PS بیشتری را پردازش کرد (Antonio et al, 2018). استفاده از فیلتر فاز (APS)، در این روش باید پیکسل‌هایی از تصویر شناسایی شود که در مدت‌زمان اخذ داده‌ها همدوس باقی بمانند. این نقاط را پراکنش‌کننده‌های پایدار (Ps)^۴ می‌نامند. فریتی و همکاران در سال ۲۰۰۰ و

3- Scatterer

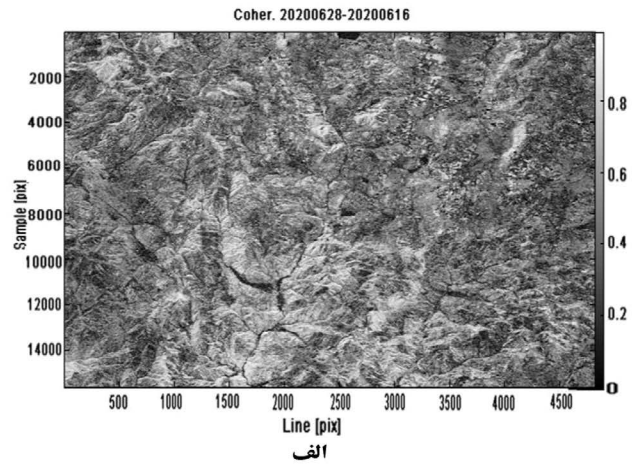
4- Persistent Scatter

1- DEM

2- Celsius



ب



الف

نگاره ۳: الف) نقشه همدوسی^۱ زوج‌های تداخل نگاری ب) نمودار تصاویر مجموعه داده‌های بالاگذر Sentinel-1A

است حاوی نویزهایی باشد که منجر به پایین آمدن کیفیت تداخل نگاشت شود، لازم است تا با اجرای فیلترهای تطبیقی اثر این نویزها از روی تداخل نگاشت حذف شود. همچنین با استفاده از فیلتر تطبیقی گلدشتاین^۳، نویزهای تداخل نگاشت کاهش یافت.

برای کاهش اثر خطای اتمسفر از تصاویر Sentinel-1A سنجنده C استفاده می‌شود زیرا این تصاویر دارای اطلاعاتی از رفتار اتمسفر هستند و می‌توانند اثر آن بر فاز امواج راداری را کاهش دهند. فاز ناشی از توپوگرافی زمین با استفاده از مدل ارتفاعی رقومی ماهواره راداری ناسا Srtm با قدرت تفکیک مکانی ۹۰ متر و اثر کرویت زمین با استفاده از پارامترهای مداری دقیق حذف می‌شوند. از اساسی‌ترین مراحل در پردازش تداخل سنجی راداری انتخاب مناسب زوج تصاویر راداری است که یک سری عوامل همچون فرکانس سنجنده، خط مبنای مکانی، خط مبنای زمانی و همچنین، هم‌پوشانی فضایی در راستای حرکت سنجنده، در انتخاب زوج تصاویر مؤثر می‌باشند.

نمودار قسمت (ج) سمت چپ نگاره شماره ۵، جابه‌جایی تجمعی در طول مدت زمان اخذ داده برای محدوده مورد مطالعه در بازه زمانی مدنظر را نشان می‌دهد و جابه‌جایی که در سطح زمین اتفاق افتاده در واقع مجموع فروافتادگی آن یعنی ماکسیمم ۱۶- و مقدار بالاآمدگی نیز

از ۲۰۰۱ از شاخص پراکندگی دامنه برای انتخاب نقاط کاندید استفاده کرده‌اند (رضایی و همکاران، ۱۳۹۷) روش‌هایی برای شناسایی و جداسازی این PS در ایتترفروگرام‌ها^۲ با استفاده از یک مدل کاربردی برای ترسیم نقشه تغییر شکل با زمان تهیه شده است. این روش‌ها در شناسایی پیکسل‌های PS در مناطق شهری و غیرشهری که در درجه اول حالت پایدار یا تغییر شکل دوره‌ای دارند، بسیار موفق بوده‌اند.

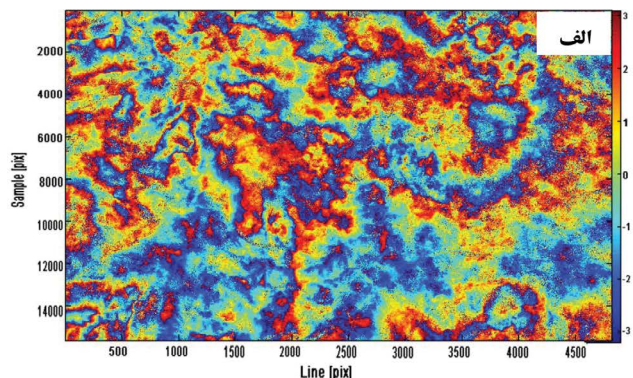
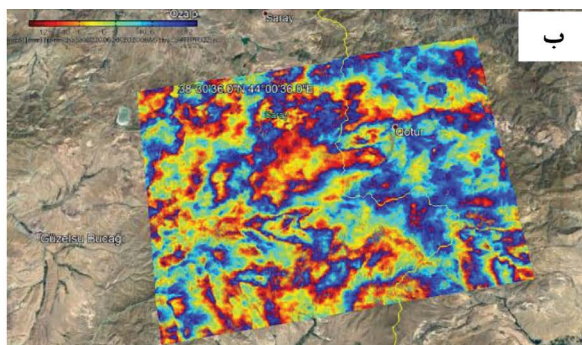
یافته‌های پژوهش

در این مطالعه با توجه به نتیجه حاصله از بررسی خط مبنای زمانی و مکانی برای تصاویر سنتینل ۱ تعداد دو تصویر مربوط به سال ۲۰۲۰ بعد از کنترل پارامترهای حاصل از خط مبنا و همدوسی برای پردازش‌های بعدی مناسب تشخیص داده شده و مبنای تهیه نقشه جابه‌جایی سطح زمین در دامنه‌های ناپایدار در محدوده مورد مطالعه قرار گرفتند. نهایتاً میزان بالاآمدگی و فروافتادگی برای سال موردنظر به دست آمد. در این پژوهش با استفاده از فیلتر تطبیقی گلدشتاین^۳، نویزهای تداخل نگاشت کاهش یافت. پس از حذف اثر توپوگرافی، تداخل نگاشت در بازه زمانی مذکور تهیه شد. از آنجایی که تداخل نگاشت حاصله ممکن

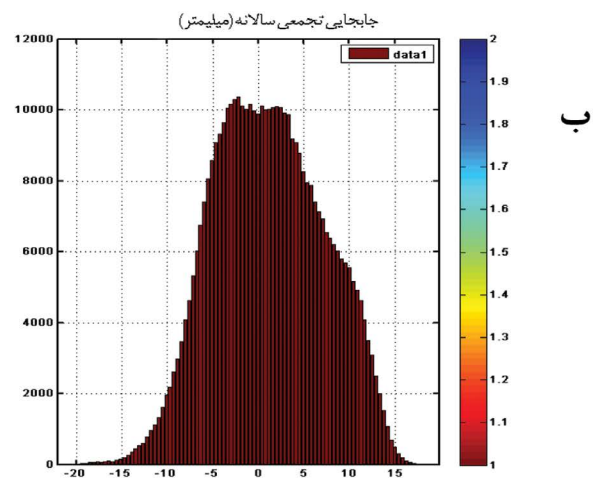
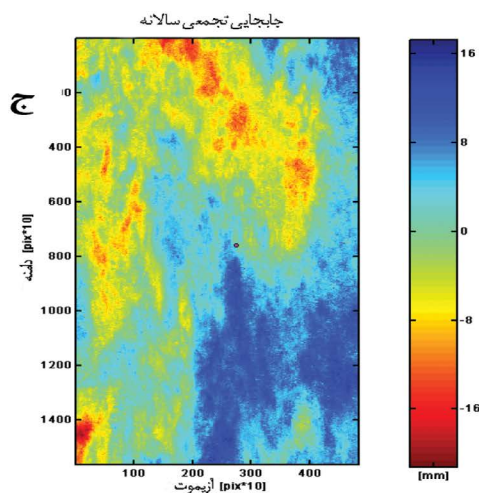
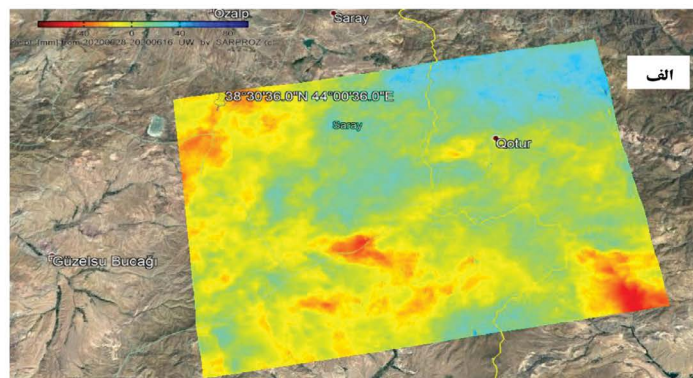
1- Coherence

2- Interferogram

3- Goldstein



نگاره ۴: تصویر تداخل‌سنجی^۱ شهر قطور با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی (SRTM DEM)



نگاره ۵: جابه‌جایی به‌دست‌آمده سطح زمین در شهر قطور با استفاده از تصاویر 1A-(Sentinel)

یا قله نمودار روی صفر قرار دارد یعنی به‌طور کلی در منطقه مورد مطالعه ما، جابه‌جایی‌های تجمعی در اکثر پیکسل‌ها مقدار صفر را دارد. به این معنا که تمامی مناطقی که پردازش شده، بالآمدگی را تجربه نکرده است و چنان‌که می‌دانید در نمودارهای جابه‌جایی سطح زمین می‌بایست نوک قله، جابه‌جایی صفر را به ما نشان دهد و همچنان

۱۶ میلی‌متر می‌باشد که به این جابه‌جایی تجمعی در طول یک سال (جابه‌جایی تجمعی سالانه) گفته می‌شود. به این معنا که تمامی مقادیر جابه‌جایی باهم جمع شده است و مقدار تجمعی را به ما داده است. نمودار سمت راست (ب) دقت و صحت کار را نشان می‌دهد چرا که تجمع نمودار

هسته جوک در جنوب شرقی منطقه بین ۴- تا ۸- میلی متر و روستاهای رازی، بلجوک در شمال غرب منطقه مورد مطالعه با مقدار بین ۹- تا ۱۲- میلی متر دچار فروافتادگی یا فرونشست شده‌اند.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق با توجه به موضوع و اهداف مورد نظر، به برآورد جابه‌جایی سطح زمین ناشی از زمین‌لرزه ۵ تیرماه سال ۱۳۹۹ پرداخته شد. ابتدا با استفاده از دو تصویر سنجنده ستینل ۱ (مسیر بالاگذر) پردازش‌های مورد نظر انجام شد و سپس با استفاده از تکنیک راداری میزان جابه‌جایی (فرونشست و بالاآمدگی) از زمین‌لرزه به دست آمد. نتایج ارزیابی میزان جابه‌جایی (فرونشست و بالاآمدگی) صورت گرفته در منطقه براساس روش پراکنشگرهای پایدار بیانگر این است که شهر قطور واقع در شمال استان آذربایجان غربی طی دوره زمانی، از تاریخ ۲۰۲۰/۰۶/۱۶ و ۲۰۲۰/۰۶/۲۸، دارای بیشترین میزان بیشینه جابه‌جایی سالانه ۱۶- (میلی متر بر سال) در شمال شرق محدوده مورد مطالعه بوده است که جابه‌جایی در راستای دید ماهواره را به دست آورده است. تداخل‌نگاشت به دست آمده از پردازش تصاویر راداری نشان داد که محدوده مورد مطالعه دارای بالاآمدگی و فروافتادگی بر اثر زلزله با روند تقریبی جنوبی و شمال شرقی می‌باشد. همچنین متوسط جابه‌جایی در بین تداخل‌نگارهای تشکیل شده برای این زمین‌لرزه حدود ۸ میلی متر در این ماه بود است. با توجه به وضعیت پیچیده زمین‌ساختی محدوده مورد مطالعه، به نظر می‌رسد که علاوه بر عوامل تکتونیکی، گسل‌های موجود در منطقه در سازمان‌دهی این روند دخیل می‌باشند. از شواهد زمین‌شناسی و همچنین توزیع سطحی پس‌لرزه‌ها، می‌توان نتیجه گرفت که مسبب رویداد این زمین‌لرزه گسل باشکالا بوده و زمین‌لرزه در پایانه جنوبی این گسل که محدود به بخش ترکیه‌ای می‌باشد رخ داده است. در بخش شمالی‌تر در ایران، این گسل با امتداد $60^{\circ}N-70^{\circ}E$ وجود دارد که با طول ۷۵ کیلومتر در

که ملاحظه می‌شود این نمودار جابه‌جایی ایجاد شده را نشان می‌دهد. یعنی حداقل بین ۱۵- میلی متر و حداکثر بین ۱۵ میلی متر فروافتادگی و بالاآمدگی دارد. در حقیقت این نمودار تعداد پیکسل‌هایی که دارای مقدار جابه‌جایی‌اند را به ما نشان می‌دهد.

تلفیق یافته‌ها

در نقشه‌های نهایی مربوط به جابه‌جایی حاصل از پردازش ایتروفرمتری، همیشه مقادیر مثبت به معنی کاهش فاصله سنجنده تا سطح زمین یا به عبارت دیگر بالاآمدگی سطح زمین بوده و مقادیر منفی نیز به معنی عکس این عمل یا همان فروافتادگی سطح زمین در جهت دید ماهواره (los)^۱ تفسیر می‌شوند (یار/حمیدی، ۱۳۹۷). براساس اطلاعات موجود در این نقشه‌ها، بیشترین و کمترین میزان شدت تغییرات سطح زمین در محدوده مورد مطالعه، بین ۱۶- الی ۱۶+ میلی متر در بازه زمانی ۱۳۹۹ استخراج شده است. بیشترین مقدار جابه‌جایی در قالب تغییرات منفی (فروافتادگی) در مناطق شمال شرقی و شمال غربی شهر قطور مشاهده شده است.

همان‌طور که در نگاره شماره ۴ قسمت ب مشاهده می‌شود اختلاف جابه‌جایی از نقطه کانون سطحی زلزله شروع شده است که محدوده شمال شرق این منطقه (روستای گوگرد) بین ۱۴- تا ۱۶- میلی متر دارای بیشترین افتادگی یا فرونشست است و در جنوب این منطقه (روستاهای کوتان‌آباد، میر عمر، گرناویک) با میزان ۹ تا ۱۶ میلی متر دچار بیشترین بالاآمدگی شده است. دیگر مناطق از جمله روستاهای کامل‌آباد، گیوران، گلر، ترس‌آباد که در جنوب غرب قطور قرار دارند بین ۴ تا ۸ میلی متر متوسط بالاآمدگی را به خود اختصاص داده‌اند. همچنین روستای حبش علیا، حبش سفلا در شمال شرقی بین ۱ تا ۴ میلی متر کمترین مقدار بالاآمدگی را تجربه کرده است. مناطق شرقی (روستاهای زری، مخین، تارمیش، چالیان، السرمه) مقدار ۳- الی ۶- کمترین مقدار فروافتادگی، روستاهای راویان،

مطالعه و پردازش زمین‌لرزه در منطقه جدید (شهر قطور) که در پژوهش‌های بسیار معدودی در مورد این منطقه کار شده، یکی از نوآوری‌های این پژوهش است. همچنین نوآوری دیگر در این پژوهش روش مورد استفاده یعنی تداخل‌سنجی راداری با فن PSI است که نتایج بسیار خوبی با دقت بسیار بالا را نشان داده است.

بر اساس مقایسه نتایج حاصل از این کار پژوهشی با نتایج پژوهش‌های انجام یافته توسط (یاراحمدی، ۱۳۹۷) استفاده از PSInSAR برای زمین‌لغزش منطقه اهر، (واجدیان و همکاران، ۱۳۹۰) بررسی زمین‌لرزه بم با استفاده از InSAR و (احمدزاده و همکاران ۱۳۹۵) که به پایش تغییرات سطحی با InSAR در شهر قطور پرداخته بودند تطابق نسبتاً خوبی مابین نتایج حاصل شده از چندین کار پژوهشی صورت گرفته، دیده می‌شود و تمامی این تحقیقات نشان داده است که روش‌های راداری از دقت مکانی بالایی برای کشف بردارهای جابه‌جایی برخوردار است و صحت روش تداخل‌سنجی راداری را در پایش دامنه‌های لغزشی و زمین‌لرزه‌ای شهر نشان می‌دهد. همچنین نتایج این تحقیق با تحقیق ((Bozkurt, 2001): Selçuk and Düzgün, 2017)) تطابق دارد که در این تحقیقات اشاره‌هایی به وجود این گسل (باشکالا) با سازوکار چپ‌گرد بوده، پتانسیل لرزه‌ای بالایی داشته است و نقش قابل توجهی در فرگشت ساختاری منطقه ایفا می‌کند. درنهایت می‌توان گفت که نحوه به‌کارگیری تصاویر راداری برای مقاصد پایش دگرشکلی و زمین‌لرزه در کشورمان امری ضروری است. همچنین استفاده از تداخل‌سنجی با فن PsInsar نشان داد که ضمن کشف میزان جابه‌جایی عمودی سطح زمین، برای تأمین پوشش زمانی مکانی وسیع و مطلوب از دقت مکانی بالایی نیز برخوردار است. می‌توان گفت که پیشرفت و افزایش کاربرد InSAR و PSI در زمینه پایش پیوسته دگرشکلی و تکنیک‌های لرزه‌نگاری در آینده بدون رقیب خواهد ماند.

بخش میانی فلات آناتولی ایران در پهنه‌های گسلی گیلانو سیه‌چشمه خوی و چالدران قرار دارد که هم‌راستا با سامانه گسلی شرق آناتولی با سازوکار غالب چپ‌گرد پتانسیل لرزه‌ای بالایی داشته است و نقش مؤثری در سازه‌های ساختاری منطقه ایفا می‌کند. میزان فعالیت لرزه‌ای تاریخی شهر قطور بسیار بالا است، کمترین و بیشترین بالآمدگی به‌ترتیب در شمال‌شرقی (روستای حبش علیا، حبش سفلا) و بخش جنوبی (روستاهای کوتان‌آباد، میر عمر، گرناویک) می‌باشد؛ و از طرفی کمترین و بیشترین فروافتادگی نیز در شرق (روستاهای زری، مخین، تارمیش، چالیان، السرمه) و شمال‌شرقی (روستای گوگرد) محدوده مورد مطالعه ثبت شده است. درواقع شدیدترین موارد بالآمدگی‌ها را می‌توان در اطراف روستاهای کوتان‌آباد، گرناویک، میر عمر مشاهده کرد؛ که بیشترین مقدار آن مربوط به روستای گیرناویک بوده و شدیدترین فروافتادگی در روستای گوگرد رخ داده است. در روستای گرناویک آثاری از گسیختگی‌های سطحی سیستماتیک منطبق با امتداد گسل باشکالا مشاهده می‌شود. نتایج به‌دست آمده از این تحقیق حاکی از این است که منطقه دارای ناپایداری‌های زیاد در دامنه‌ها خصوصاً در قسمت‌های شمال‌شرقی و جنوب منطقه می‌باشد. همچنین برخی از گسل‌های موجود در سطح منطقه هنوز هم فعال هستند. هرچند لازم است برای صحت بیشتر نتایج به‌دست آمده در کارهای پژوهشی بعدی از روش‌ها و فن‌های پیشرفته‌تر تداخل‌سنجی راداری استفاده شود. از سوی دیگر لازم است که به‌منظور بررسی وضعیت زمین‌لرزه‌های بزرگ موجود در منطقه مثل گوگرد، گرناویک، کوتان‌آباد، میر عمر و سایر آبادی‌ها هرکدام از آن‌ها به‌صورت منفرد و جداگانه توسط روش‌های تداخل‌سنجی اینترفرومتری موردبررسی و ارزیابی قرار گیرند. این پژوهش از داده‌های باند پهن مرکز لرزه‌نگاری کشوری وابسته به مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران^۱ و سایر مراکز لرزه‌نگاری ازجمله پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله^۲ استفاده شده است.

1- IRSC

2- IIEES

منابع و مآخذ

آبخیز اهر چای " سیزدهمین همایش ملی علوم مهندسی آبخیزداری ایران و سومین همایش ملی صیانت از منابع طبیعی و محیط زیست ۱۰؛ و ۱۱ مهرماه ۱۳۹۷ دانشگاه محقق اردبیلی.

8- Antonio M, Armenterosa R, Lazekyd M, Hlaváčová I, Bakoň M, Delgado J, Joaquim J, Sousah, Francisco Lamas Fernández, Marchamaloj M, Caro-Cuencak M, Papcol J, Perissin D, 2018, Deformation monitoring of dam infrastructures via spaceborne MT-InSAR. The case of La Viñuela (Málaga, southern Spain), *Procedia Computer Science* 138, 346–353.

9- Beladam O, Balz T, Mohamadi B, Abdalhak M, 2019, Using PS-InSAR with Sentinel-1 Images for Deformation Monitoring in Northeast Algeria, *Geosciences* 2019, 9, 315.

10- Colesanti, C. Ferretti, A. Novali, F. Prati, C. Rocca, F. SAR monitoring of progressive and seasonal ground deformation using the permanent scatterers technique. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2003, 41, 1685–1701.

11- Delgado Blasco, J.M. Fomelis, M. Stewart, C. Hooper, A. Measuring Urban Subsidence in the Rome Metropolitan Area (Italy) with Sentinel-1 SNAP-StaMPS Persistent Scatterer Interferometry. *Remote Sens.* 2019, 11, 129.

12- Eruption using InSAR, *Remote Sens.* 11718.

13- Fárová k, Jelének j, Kopa v, Strnadová v, Kysel p, 2019, Sentinel-1 Data Comparing DInSAR and PSI Techniques Employed to Monitor Highway Stability: A Case Study of a Massive Dobkovičky Landslide, Czech Republic, *Remote Sens.* 2019, 11, 2670.

14- Ferretti, A. Prati, C. Rocca, F. Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2000, 38, 2202–2212.

15- Fryksten J, Nilfouroushan F, 2019, Analysis of Clay-Induced Land Subsidence in Uppsala City Using Sentinel-1 SAR Data and Precise Leveling, *Remote Sens.* 2019, 11(23), 2764, 18PP.

16- GRANDIN R, VALLÉE M, LACASSIN R, 2017, Rupture process of the Oklahoma Mw5.7 Pawnee earthquake from Sentinel-1 InSAR and seismological

۱- احمدزاده، روستایی، نیکجو، دهقانی؛ حسن، شهرام، محمدرضا، مریم، ۱۳۹۳، برآورد مساحت و حجم توده لغزشی با استفاده از تکنیک‌های insar و مشاهدات GPS (مطالعه موردی: پهنه لغزشی گوگرد)، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال چهارم، پاییز ۱۳۹۴، شماره ۲ (پیاپی ۱۴).

۲- اصغری سراسکانرود، مدیرزاده؛ صیاد، ریحانه، ۱۳۹۹، برآورد تغییرات عمق برف در سطح شهرستان اردبیل و سرعین با استفاده از داده‌های ماهواره Sentinel1 با روش تداخل‌سنجی راداری، تحقیقات منابع آب ایران، سال شانزدهم، شماره ۱، بهار ۱۳۹۹، شماره ۴۰۷–۳۹۴.

۳- حاجب، موسوی، معصومی، رضایی؛ زهرا، زهرا، زهره، ابوالفضل، ۱۳۹۷، بررسی فرونشست دشت قم با استفاده از تداخل‌سنجی راداری، مجموعه مقالات هجدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، اردیبهشت ۱۳۹۷، صفحه ۳۵۲–۳۵۵.

۴- علیخان‌زاده، رضا، ۱۳۹۹، گزارش مقدماتی رخداد زمین‌لرزه ۵ تیرماه ۱۳۹۹ قطور استان آذربایجان غربی، معاونت زمین‌شناسی دفتر بررسی مخاطرات زمین‌شناسی، زیست‌محیطی و مهندسی گروه لرزه‌زمین‌ساخت و لرزه‌شناسی، صفحه ۹–۱.

۵- فتح‌الهی، آخوندزاده هنزائی، بحرودی؛ نرگس، مهدی، عباس، ۱۳۹۷، بررسی فرونشست زمین در اثر استخراج مواد نفتی با استفاده از روش تداخل‌سنجی رادار، فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی، دوره ۲۷، شماره ۱۰۵، بهار ۹۷.

۶- واجدیان، سراجیان، منصوری؛ ساناز، محمدرضا، بابک، ۱۳۹۰، استخراج میدان جابه‌جایی سه‌بعدی با استفاده از فن تداخل‌سنجی رادار با درجه بررسی موردی گسل بم؛ SAR مصنوعی، ۹۶ – ۱۳۹۰، صفحه ۸۳، مجله فیزیک زمین و فضا، دوره ۳۷، شماره ۲.

۷- یاراحمدی، جمشید (۱۳۹۷) آشکارسازی ناپایداری‌های دامنه‌های با استفاده از پراکنشگر دائمی (PSI) در حوضه

- 26- Owczarz k, Blachowski j, 2020, Application of satellite radar interferometry in study of the relation between surface deformation and seismic event of the 15th September 2018 in the Rudna copper mine, Poland, GEOKINEMATISCHER TAG, pp93-104.
- 27- Qin Y, Perissin D, 2015, Monitoring Ground Subsidence in Hong Kong via Spaceborne Radar: Experiments and Validation, Remote Sens. 2015, 7, 10718.
- 28- Roquea D, Fonseca A, Henriques M, Falcão A, 2014, A first approach for displacement analysis in Lisbon Downtown using PS-InSAR, Procedia Technology 16 (2014) 288 – 293.
- 29- Selçuk, A.S. Erturaç, M.K. & Nomade, S. 2016, Geology of the Çaldıran Fault, Eastern Turkey: Age, slip rate and implications on the characteristic slip behaviour. Tectonophysics, v. 680, p. 155-173.
- 30- Suresh D, Yarrakula K, 2019, InSAR based deformation mapping of earthquake using Sentinel 1A imagery, Geocarto International, 559-568.
- 31- Tolomei C, Caputo R, Polcari M, Famiglietti N, 2021, The Use of Interferometric Synthetic Aperture Radar for Isolating the Contribution of Major Shocks: The Case of the March 2021 Thessaly, Greece, Seismic Sequence, Geosciences 2021, 11, 191.
- 32- TONG MINH D, Hanssen O, Rocca F, 2020, Radar Interferometry, 20 Years of Development in Time Series Techniques and Future Perspectives, Remote Sens. 2020, 12(9), 1364.
- 33- Vince M, del M, 2020, Earthquake Deformation Mapping caused by the Taal Volcano, pp23-45.
- 34- Wibowo S, Hadmoko D, Isnaeni Y, Farda N.M, Putri A, Nurani I, Supangkat S, 2021, Spatio-Temporal Distribution of Ground Deformation Due to 2018 Lombok Earthquake Series, remote sensing, Sens. 2021, 13, 2222.
- 35- Xiaohua X, David T, Smith-Konter B, 2020, Coseismic Displacements and Surface Fractures from Sentinel-1 InSAR: 2019 Ridgecrest Earthquakes. Seismol. Res. Lett. XX, 1–7.
- Grandin, Vallée, Lacassin, Seismological Research Letters, in press, 2017 – p. “1.
- 17- Jácome M, Graña A, M Valdés V, 2020, Detection of Terrain Deformations Using InSAR Techniques in Relation to Results on Terrain Subsidence (Ciudad de Zaruma, Ecuador) Remote Sens. 2020, 12, 1598.22PP.
- 18- Kaplan O, Kaplan G, 2021, Response Spectra-Based Post-Earthquake Rapid Structural Damage Estimation Approach Aided with Remote Sensing Data: 2020 Samos Earthquake, Buildings 2022, 12, 14. <https://doi.org/10.3390/buildings12010014>, <https://www.mdpi.com/journal/buildings>, pp1-17.
- 19- Karakhanian, A. Trifonov, V. Philip, H. Avagyan, A. Hessami, K. Jamali, F. Bayraktutan, S. Bagdassarian, H. Arakelian S. and Davatian, V. 2004. Active faulting and natural hazards in Armenia, Eastern Turkey and North-Western Iran, Tectonophysics, 380, 189-219.
- 20- Karimzadeh S, Mansouri B, Osmanoglu B, Djamour Y, Application of Differential SAR Interferometry (DInSAR) for Interseismic Assessment of North Tabriz Fault, Iran. 2011, pp78-96.
- 21- Kaya b, Aladağ c, 2017, Determining the Cognitive Structures of Geography Teacher Candidates on “Earthquake”, International Education Studies; Vol. 10, No. 1; 2017, Published by Canadian Center of Science and Education, pp122-136.
- 22- Kirui P, Reinosch E, Isya N, Riedel B, Gerke M, 2021, Kirui P, Reinosch E, Isya N, Riedel B, Gerke M, 2021, Mitigation of Atmospheric Artefacts in Multi, ORIGINAL ARTICLE, <https://doi.org/10.1007/s41064-021-00138-z>
- 23- Kyriou, A. Nikolakopoulos, K. Assessing the suitability of Sentinel-1 data for landslide mapping. Eur. J. Remote Sens. 2018, 51, 402–411.
- 24- Lazecký M, Perissin D, Zhiying W, Ling L, Yuxiao Q, 2016, Observing Dam’s Movements with Spaceborne SAR Interferometry, Engineering Geology for Society and Territory – Volume 5, 131-136.
- 25- Li Y, Jiang W, Zhang J, Li B, Yan Y, Wang X, 2020, Sentinel-1 SAR-Based coseismic deformation monitoring service for rapid geodetic imaging of global earthquakes, Natural Hazards Research 1 (2021) 11-19.

