



جغرافیا و روابط انسانی، زمستان ۱۴۰۲، دوره ۶، شماره ۳، صص ۱۶۴-۱۴۵

پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای (مطالعه‌ی موردی: حوضه‌ی
آبخیز بالهارود شهرستان گرمی)

ناصر قاطع^۱، توحید ملک زاده دیلمقانی^۲، الهامه پورقاسمی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، رشته سنجش از دور، دانشکده ی فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد

اهر، اهر، ایران

۲- استادیار گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر، اهر،

ایران tohidmelikzade1973@gmail.com

۳- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه جغرافیای طبیعی (اقلیم‌شناسی)، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۱۸

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۰۵

چکیده

یکی از انواع ناپایداری دامنه‌ای که هر ساله خسارات مالی و جانی فراوانی را بر زندگی انسان‌ها وارد می‌نماید، مخاطره زمین‌لغزش است که پیامدهای اجتماعی، اقتصادی و زیست محیطی را به دنبال دارد. حوضه بالهارود شهرستان گرمی به علت کوهستانی بودن و وجود شیب‌های تند یکی از مناطق مستعد وقوع زمین‌لغزش است. بررسی عوامل موثر در وقوع زمین‌لغزش و شناخت نواحی مستعد آن گامی مهم در مدیریت منابع طبیعی و رسیدن به توسعه پایدار به شمار می‌رود. تکنیک تداخل‌سنجی راداری به عنوان روش کارآمد در اندازه‌گیری جابه‌جایی سطح زمین می‌باشد. این فناوری در بررسی مخاطرات طبیعی زمین از جمله حرکات توده‌ای دامنه‌ها، فرونشست، زلزله و فعالیت‌های آتشفشانی بسیار متداول شده است. در این پژوهش، به منظور شناسایی و اندازه‌گیری زمین‌لغزش از تصاویر راداری سنتینل ۱ سال‌های ۲۰۲۰ و ۲۰۲۲ استفاده شده است. به‌منظور پردازش اطلاعات نیز از نرم افزار SARSCAPE استفاده شده است که بالاترین بیش‌ترین جابجایی زمین‌لغزش در خلاف جهت دید، ۰/۱۵۴- سانتیمتر برآورد گردید که در راستای خطوط گسلی و در مرکز منطقه مورد مطالعه مشاهده شده است. همچنین نتایج این پژوهش نشان داد که تصاویر راداری از پتانسیل خوبی برای آشکارسازی ناپایداری دامنه‌ها و محاسبه جابه‌جایی آن‌ها برخوردار می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: زمین‌لغزش، تداخل‌سنجی راداری، سنتینل ۱، حوضه بالهارود.

مقدمه

زمین لغزش یکی از خطرات طبیعی است که همه ساله خسارات جانی و مالی فراوانی را در مناطق کوهستانی، پرباران و لرزه خیز دنیا به همراه دارد. در ایران متاسفانه وقوع زمین لغزش در نواحی کوهستانی وضعیت این پدیده را از یک رویداد مورفولوژیکی هر چند پر خسارت به سوی ناامنی فضایی (Vulnerability) و فاجعه نهفته سوق داده است. پیش بینی وقوع زمین لغزش در یک منطقه در کاهش خطرات و خسارات ناشی از بروز این امر نقش موثری دارد. هم چنین حرکت های توده ای نقش موثری در تخریب جاده های ارتباطی، مراتع، ایجاد فرسایش و رسوب در حوضه های آبخیز داشته و یکی از مهم ترین عوامل تغییر دهنده فعال در لندفرم های کوآترنر می باشد. از آنجا که پیش بینی زمان وقوع زمین لغزش ها مشکل است، از این رو شناسایی مناطق حساس به زمین لغزش و پهنه بندی این مناطق بر اساس پتانسیل خطر ناشی از بروز این پدیده، دارای اهمیت است و تا حد امکان باید از مناطق با احتمال پتانسیل نسبی بالاتر خطر زمین لغزش دوری جست (شیرانی، ۱۳۹۲: ۲۵). زمین لغزش به عنوان یک رفتار مورفولوژیکی مخاطره آمیز، حاصل عملکرد عوامل طبیعی و انسانی است که همانند دیگر بی نظمی های مورفولوژیکی، موجب بروز خسارت به تأسیسات، زیرساخت ها و دارایی های انسان می گردد. یکی از وظایف عملی و قابل توجه دانش ژئومورفولوژی، شناسایی لندفرم های پایدار و مکان هایی با حداقل احتمال گرفتاری به پدیده های کاتاستروفیک یا آرام ناشی از فرآیندهای طبیعی یا انسانی است که به نوعی، اثر نامطلوبی به اشغال یا استفاده ی انسانی می گذارد. از آنجایی که حرکات توده ای در نواحی کوهستانی یکی از فرآیندهای طبیعی و از مهم ترین عوامل بوجود آورنده ی چشم اندازها محسوب می شود. لذا پهنه بندی حساسیت زمین لغزش یکی از ابزارهای اساسی در مدیریت مخاطرات و تصمیم سازی در مدیریت محیط به ویژه در مناطق کوهستانی محسوب می شود. زیرا این چشم اندازهای سست و شکننده امکان ایجاد و توسعه ی سکونتگاه ها و دیگر ساخت و سازهای مهندسی را محدود می نمایند (احمدزاده، ۱۳۹۳: ۵). حوضه آبریز رودخانه مرزی بالهارود یکی از زیرحوضه های رودخانه ارس می باشد. این رودخانه در شرق شهرستان گرمی جاری است. سرچشمه این رود چشمه های جنگلی جمهوری آذربایجان می باشد. این رودخانه در قسمتی از مسیر خود به طول ۶۲/۵ کیلومتر تا شهر بیله سوار مرز جمهوری اسلامی ایران و جمهوری آذربایجان را تشکیل می دهد که از بیله سوار به بعد از کشور ایران خارج شده و وارد خاک جمهوری آذربایجان می گردد. به طور کلی منطقه مورد مطالعه و اطراف آن از نظر توپوگرافی، یک منطقه کوهستانی است. با توجه به اهمیت مسائل مرتبط با زمین لغزش و حرکات توده ای در سطح حوضه آبریز بالهارود، طی چندین دهه گذشته زمین لغزه های

زیادی به وقوع پیوسته و خساراتی را بر ساکنین منطقه و جاده‌های ارتباطی وارد ساخته است. با توجه به اینکه استفاده از روش‌های سنتی مانند نقشه برداری زمینی و غیره به دلیل پرهزینه و وقت گیر بودن آن‌ها منسوخ گردیده است، در سال‌های اخیر به دلیل دسترسی رایگان به داده‌های راداری ماهواره سنتینل ۱، و دانلود تصاویر آن از سال ۲۰۱۴ میلادی تا حال، استقبال محقق به استفاده از این داده‌ها بسیار گسترش یافته است. تداخل سنجی تفاضلی راداری به واسطه بهره‌گیری از داده‌های راداری با قابلیت تکرارپذیری آن، تاکنون یکی از دقیق‌ترین و کم‌هزینه‌ترین روش‌های سنجش از دور، برای شناسایی و پایش تغییرات سطحی زمین در مقیاس سانتیمتر بوده است. اما با توجه به محدودیت یا عدم دسترسی به داده‌های سنجش از دور نوری و راداری با قابلیت تفکیک بالا، این مهم در ایران، به ویژه در مطالعات ژئومورفولوژیکی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. لذا پژوهش حاضر به دنبال ورود به مطالعات ژئومورفولوژیکی با بکارگیری داده‌های راداری و تکنیک‌های پردازشی آن در جهت ارزیابی رفتار توده‌های لغزشی موجود در منطقه‌ی مورد مطالعه، شناسایی لغزش‌های احتمالی در آینده و مدیریت حوضه‌ای از لحاظ مخاطرات زمین لغزش می‌باشد. چرا که مطالعه‌ی اشکال سطحی زمین، در قلمرو علم ژئومورفولوژی و شناسایی تغییرات سطح زمین از عمده کاربردهای تکنیک‌های تداخل سنجی راداری است.

مبانی نظری و پیشینه تحقیق

زمین لغزش

زمین لغزش عبارت است از حرکات کلی و عمقی تمام قشر خاک بر روی سطح زمین مادری که هر ساله موجب خسارت‌های سنگینی می‌گردد که بعضی مواقع جبران این خسارت‌ها ممکن نیست و نیازمند صرف وقت و هزینه‌ی زیادی است. سرعت عملکرد و وسعت آن‌ها غالباً پدیده‌های دیدنی و گاهاً فاجعه‌باری را بوجود می‌آورد و ممکن است ده‌ها یا صدها هزار متر مکعب سنگ و خاک را یک‌جا تحت تأثیر قرار دهند. این پدیده بیشتر در سنگ‌های منفصل دانه دانه عمل می‌کند (عوضیان، ۱۳۹۶: ۱۰). برای رخ دادن زمین لغزش ۳ شرط لازم است: شیب باید به اندازه‌ی کافی تند باشد تا توده‌ی خاک بتواند بلغزد، در عمق خاک یک لایه‌ی غیر قابل نفوذ یا با نفوذپذیری کم وجود داشته باشد، در لایه‌ی سطحی خاک، آب به مقدار کافی وجود داشته باشد. در اثر تغییر مقدار آب موجود در توده‌ی عظیمی از سازندهای سطحی که دارای مقدار نسبتاً زیادی از مواد دانه‌ریز خصوصاً رس و لیمون است، تغییر حالت در آن رخ می‌دهد. ثبات موجود در توده‌ی مذکور در حالت جدید از بین می‌رود. نیروی ثقل ناشی از شیب

دامنه در حالت قبلبیر نیروی سایش بین مواد به دلیل حالت خاص آن فزونی نمی‌یافت اما در حالت جدید در اثر رسیدن آب و گذشتن آن از یک حد معین که به اتربرگ یا پلاسیسته معروف است (حالتی تقریباً شبیه یک نوع خمیر و یا لاقل در طول محوری غالباً قوسی شکل مشابه خمیر) رابطه‌ی نیروی ثقل و نیروی سایش دگرگون می‌گردد (آزادی، ۱۳۹۴: ۱۵).

تکنیک تداخل‌سنجی راداری:

تکنیک تداخل‌سنجی راداری در میان روش‌های زمینی و فضایی به‌عنوان کاراترین روش برای اندازه‌گیری تغییرات سطح زمین با دقت و قدرت تفکیک مکانی بسیار بالا محسوب می‌گردد. در این فناوری تصاویر مختلط راداری که حاوی مقادیر فاز و دامنه موج برگشتی از عارضه به سمت سنجنده هستند با یکدیگر تلفیق شده و تصویری به نام اینترفروگرام تولید می‌شود. اینترفروگرام تصویری است که از اختلاف فاز دو تصویر اخذ شده در دو زمان مختلف که از نظر هندسی به‌طور دقیق بر روی هم منطبق گشته‌اند حاصل می‌شود. در یک اینترفروگرام اطلاعات اختلاف فاز دو تصویر که مبین اختلاف فاصله عارضه تا سنجنده در دو زمان اخذ تصویر است موجود می‌باشد. به کمک مقدار اختلاف فاز می‌توان پارامترهای مختلف از جمله میزان جابجایی سطح زمین و یا توپوگرافی سطح زمین را استخراج نمود (حقیقت‌مهر، ۱۳۸۹: ۲۵).

مطالعات زیادی با استفاده از روش‌های متعدد در مناطق مختلف جهان در زمینه آشکارسازی تغییرات محیطی انجام شده است که در زیر به چند مورد داخلی و خارجی اشاره می‌شود. لورنس^۱ (۲۰۰۳) در تحقیق خود به پدیدار شدن کاربردهای تداخل‌سنجی راداری در ژئومورفولوژی و هیدرولوژی پرداخته است. ایشان این تکنیک را یک ابزار ژئودتیک قدرتمند برای تولید مدل‌های ارتفاعی رقومی و تصویر کردن جابجایی‌های زمین در ارتباط با تغییرات پوسته و جریان صفحات یخی در مقیاس میلی‌متری معرفی می‌نماید. رویرینگ^۲ و همکاران (۲۰۰۶) با استفاده از تداخل‌سنجی تفاضلی (DinSAR) لیدار هوایی (LiDAR) و آرشیو عکس‌های هوایی، زمین‌لغزش و انتقال رسوب با تکنیک‌های دورسنجی در تعیین مشخصات زمین‌لغزش‌های بزرگ با حرکت بطئی در حوضه رودخانه ایل در کالیفرنیا شمالی را مطالعه کردند و بر اساس اینترفروگرام‌هایی که بدست آوردند توانستند ۵ زمین‌لغزش بزرگ

¹ Laurence

² Roering

را مشخص کنند. سامسونف^۱ (۲۰۰۷) در پژوهشی به ادغام اندازه‌گیری‌های تکنیک تداخل‌سنجی تفاضلی و GPS برای مطالعه تغییر شکل زمین پرداخت و در تکنیک تداخل‌سنجی تفاضلی از دو تداخل‌سنج (مشاهدات مدارات نزولی و مدارات صعودی) استفاده نمود. وی پیشرفت در دقت و سرعت کاری بهینه این روش را در مقایسه با سایر روش‌های مشابه، بسیار زیاد و در حد دقیقه در برابر روز برشمرد. نامبرده در این تحقیق به بررسی نشست زمین، فعالیت آتشفشانی و حرکت افقی گسل‌ها با استفاده از داده‌های GPS و تکنیک تداخل‌سنجی تفاضلی پرداخته است. نتایج نشان داد که در حال حاضر دگرگونی سطحی چشمگیری ناشی از فعالیت فورانی در آینده در منطقه مورد نظر وجود ندارد. کاستاندا^۲ و همکاران (۲۰۰۹) در پژوهشی به اندازه‌گیری‌های دگرگونی سطح زمین ناشی از نشست زمین در اثر گودال‌ها، معدن‌کاری و زمین‌لغزش‌ها در رودخانه‌ی ایبرو اسپانیا با تکنیک تداخل‌سنجی تفاضلی پرداختند. در این تحقیق از ۲۷ فریم تصویر رادار ERS طی سال‌های ۱۹۹۵ تا ۲۰۰۰ با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی تفاضلی، بزرگی و میزان جابجایی‌ها را در محدوده‌ی دگرگونی استفاده گردید. نرخ دگرگونی اندازه‌گیری شده برای گودال‌ها به ۱/۶۸ سانتی‌متر در سال، برای زمین‌لغزش‌ها ۰/۸ سانتی‌متر در سال و برای ناحیه‌ی متأثر از فرونشست معدن-کاری ۱/۴۵ سانتی‌متر در سال برآورد گردید. همچنین سری‌های دگرگونی زمانی یک جابجایی پیش‌رونده به سمت پایین، در ارتباط با سه پدیده در محدوده‌ی زمانی تحلیل شده را آشکار ساخت. آنالیز تکنیک تداخل‌سنجی تفاضلی با روش اسباس اندازه‌های دگرگونی تعداد کمی از گودال‌ها و زمین‌لغزش‌های فعال شناخته شده (۵-۱۰ درصد) را فراهم نمودند. هوپر^۳ و همکاران (۲۰۱۲) در تحقیقی به بررسی پیشرفت‌های اخیر در آنالیز سری‌های زمانی تداخل‌سنجی رادار روزنه‌ی ترکیبی برای اندازه‌گیری تغییرات پوسته‌ی زمین پرداختند. طبق نظر ایشان، تداخل‌سنجی رادار روزنه ترکیبی (SAR) تکنیکی است که امکان تشخیص تغییر شکل در سطح زمین از راه دور را فراهم می‌نماید؛ که به‌طور گسترده برای اندازه‌گیری جابجایی‌های مرتبط با زمین‌لرزه، فعالیت‌های آتشفشانی و بسیاری دیگر از پدیده‌های تغییر شکل پوسته استفاده شده است. آن‌ها ضمن بررسی پیشرفت‌های اخیر، به این نتیجه رسیدند که دقت روش‌های سری زمانی تداخل‌سنجی رادار روزنه ترکیبی بیشتر بهبود یافته است. پژوهش ایشان نمونه‌هایی از الگوریتم‌های بهبود یافته‌ی اعمال شده به تغییر شکل پوسته، در تصویر مربوط با فوران ۲۰۱۰ آتشفشان ایجافجالا جوکول در ایسلند، لغزش آهسته در زون فرورانشی گوئررو در مکزیک، و تغییر شکل

¹ Samsonov

² Castaneda

³ Hooper

تکتونیک در غرب آناتولی ترکیه. سولاری^۱ و همکاران (۲۰۱۷) در تحقیقی به آشکارسازی سریع حرکات زمین بر روی عناصر آسیب‌پذیر با استفاده از داده‌های INSAR ماهواره Sentinel-1 اقدام کرده‌اند. آن‌ها از تصاویر راداری سنتینل در بازه زمانی نوامبر ۲۰۱۴ تا سپتامبر ۲۰۱۶ برای انجام تجزیه و تحلیل‌های خود سود برده‌اند. نتایج تداخل‌سنجی راداری منجر به شناسایی ۱۰ منطقه لغزشی فعال در منطقه مورد مطالعه گردیده است. ایتریری^۲ و همکاران (۲۰۱۷) با استفاده از داده‌های راداری سنتینل ۱ طی سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۷ به شناسایی گسیختگی پیشرونده زمین‌لغزش مائوکسین در استان سیچوان چین اقدام کرده‌اند. تصاویر به دست آمده از محدوده مورد مطالعه از طریق روش تداخل‌سنجی چندتفاضلی راداری مورد پردازش قرار گرفته است. نتایج حاصل از این روش، حداکثر میزان جابجایی را ۲۷ میلی‌متر در سال نشان می‌دهد. کنفورتو^۳ و همکاران (۲۰۱۹) در تحقیقی اقدام به پایش عملکرد مناطق تحت زمین‌لغزش از طریق تکنیک‌های زمینی و ماهواره‌ای کرده‌اند. آن‌ها برای این منظور از ۵۹ تصویر ماهواره COSMO-SkyMed با تکنیک تداخل‌سنجی تفاضلی از ماه مه ۲۰۱۱ تا آگوست ۲۰۱۶ استفاده کرده‌اند. روستایی و همکاران (۱۳۹۲)، به شناسایی و پایش زمین‌لغزش با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی تفاضلی راداری در حوزه آبخیز گرم‌چای میانه پرداخته‌اند. طبق نتایج حاصل از این پژوهش مشخص شده است که در سطح زمین‌لغزش‌های تثبیت شده قدیمی همچنان فعالیت وجود دارد و این محدوده‌ها به عنوان منابع مهم رسوب‌زایی در نظر گرفته شده‌اند. دلیل انتخاب این محدوده‌ها به عنوان منابع رسوب‌زایی به دلیل مجاورت با شبکه هیدرولوژیکی می‌باشد. در طی این تحقیقات در اثر جریان واریزه‌های شناسایی شده در مجاورت روستاهای آتاجان، بناوران و اوین بیشترین میزان جابجایی به اندازه ۸/۵ سانتیمتر برآورد شده است. پژوهشگران این مقاله نتایج حاصل از تحقیقات را با روش‌های ژئودتیک و پیمایش صحرائی دقت‌سنجی کرده‌اند. خاکسار بلداجی (۱۳۹۳) با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری به منظور ارزیابی تأثیر رانش زمین بر بار رسوبی بخشی از سراب حوضه‌ی کارون شمالی پرداخت. نتایج حاکی از بیشینه زمین‌لغزش برابر ۳۰ سانتی‌متر برای سنجنده ASAR و ۶۰ سانتی‌متر برای سنجنده PALSAR طی بازه زمانی ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۰ بوده است. همچنین نتایج حاصل از مقایسه نقشه‌های زمین‌لغزش با آمار رسوب ایستگاه خروجی حوضه نشان داد که تناسب خوبی میان آن‌ها وجود دارد. شیرانی و همکاران (۱۳۹۵)، در منطقه نقل سمیرم و با به کارگیری تکنیک تداخل‌سنجی راداری به بررسی زمین‌لغزش فعال در منطقه پرداخته‌اند.

¹ Solari

² Intriari

³ Confuorto

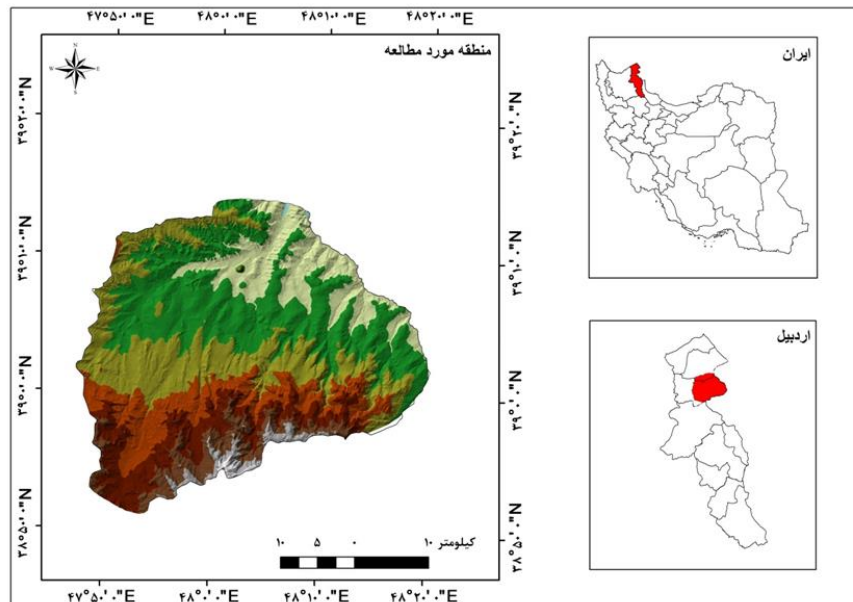
هدف تحقیق در این مقاله شناسایی محدوده لغزشی نقل به صورت مقدماتی و همچنین برآورد میزان فعالیت ناشی از آن بوده است که به منظور پیشبرد اهدافشان از تکنیک تداخل‌سنجی راداری استفاده کرده‌اند. بیشترین میزان جابجایی که در این تحقیق حاصل شده مربوط به زوج تصویری ۳ آگوست ۲۰۱۱ و ۳۱ دسامبر ۲۰۱۱ با بازه زمانی ۱۵۰ روز بوده است. مقدار جابجایی بدست آمده ۸ سانتیمتر می‌باشد. طبق نتیجه حاصل از این پژوهش می‌توان به فعال بودن توده لغزشی منطقه نقل در مدت زمان اخذ تصاویر راداری در بازه زمانی مورد بررسی، پی برد. این مقاله نشان می‌دهد که روش پردازش تداخل‌سنجی تفاضلی راداری و همچنین داده‌های راداری در پایش و شناسایی زمین‌لغزش و محاسبه میزان جابجایی دارای پتانسیل خوبی می‌باشند. جامع (۱۴۰۰)، در پژوهشی به شناسایی و پایش ناپایداری دامنه‌ای حوضه رودخانه نیرچایی با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی تفاضلی راداری و الگوریتم sbas پرداخت. نامبرده در این پژوهش از ۸ تصویر سنتینل ۱ راداری باند C عاری از برف در روی زمین منطقه مورد مطالعه برای سال‌های ۲۰۱۷ و ۲۰۲۰ استفاده کرده است. در این پژوهش مقدار بدست آمده از الگوریتم sbas، ۹۶ سانتی‌متر می‌باشد، که با توجه به نقشه‌ای که تهیه شد و مقایسه‌ای که با نقشه‌های طبقه‌بندی انجام شد می‌توان بیان کرد که میزان زمین‌لغزش در سال ۲۰۱۷ و ۲۰۲۰ بیشتر در کاربری‌های کشاورزی آبی و مراتع اتفاق افتاده، در سال ۲۰۱۷ در زمین بایر میزان زمین‌لغزش اتفاق افتاده به ندرت دیده می‌شود، در حالیکه در سال ۲۰۲۰ در کلاس زمین بایر میزان زمین‌لغزش اتفاق افتاده قابل توجهی به چشم می‌خورد. در نهایت نتایج نشان داد که، که روش Dinsar از قابلیت‌های زیادی برای شناسایی مخاطرات طبیعی از جمله زمین‌لغزش و... برخوردار می‌باشد ولی چون دارای محدودیت‌هایی می‌باشد نتیجه دقیقی را ارائه نمی‌دهد ولی الگوریتم sbas از قابلیت بالایی برای آشکارسازی و شناسایی میزان ناپایداری دامنه‌ای برخوردار هستند و نتیجه‌ای که ارائه می‌دهد دقیقتر از روش Dinsar می‌باشد.

روش شناسی

منطقه مورد مطالعه

شهرستان گرمی در شمال غرب ایران و در محدوده جغرافیایی عرض شمالی ۳۹ درجه و ۱ دقیقه و طول شرقی ۴۸ درجه و ۴ دقیقه در استان اردبیل و در سطوح توپوگرافی با اراضی بسیار ناهموار (دامنه‌های شیب‌دار) واقع شده است. بارندگی متوسط سالانه آن ۳۰۰ میلی‌متر برآورد شده است. ارتفاع متوسط منطقه مورد مطالعه از سطح دریای آزاد ۸۵۰ متر می‌باشد و زمین لغزش یکی از مهم‌ترین مخاطرات محیطی در شهرستان گرمی است. بلغارچای در

شرق شهرستان گرمی جاری است و این شهرستان را از شهرستان یاردیملی و جلیل‌آباد جمهوری آذربایجان جدا می‌کند. سرچشمه این رود چشمه‌های جنگلی جمهوری آذربایجان و روستاهای سیا (چشمه‌های خل‌خانا، داش‌نو بولاغ، بوز بولاغ و سویوغ بولاغ)، بورک‌آباد، افسوران، پلمه‌یتر و جنگان بوده و از پیوند چندین رود از جمله مهره‌چایی، گرمی‌چای و شوون‌چایی بوجود می‌آید. کناره‌های مرزی این رودخانه تفرجگاه مردم منطقه گرمی است. این رودخانه پس از اتصال تمام شاخه‌هایی که از کوه‌های شهرستان سرچشمه می‌گیرند پس از گذر از روستایی به نام هادی بیگلو وارد محدوده شهرستان بیله‌سوار شده و مرز این شهرستان را با جمهوری آذربایجان تعیین می‌کند و پس از گذر از این شهرستان وارد خاک جمهوری آذربایجان می‌شود و بر خلاف تصور ریزش‌گاه آن دریای خزر نیست و به دریاچه محمودچاله می‌ریزد. در میان مردم منطقه به بلغارچایی معروف است. بر روی این رودخانه در داخل خاک جمهوری آذربایجان در زمان اتحاد جماهیر شوروی سدی به نام سد بلغارچای احداث شده که نقش حیاتی در آبیاری دشت مغان آن سوی مرز دارد. در شکل (۱) موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه نشان داده شده است.



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

مواد و روش

داده‌ها و نرم افزارهای مورد استفاده

تصاویر ماهواره‌ای

ماهواره سنتینل-۱ اولین سری از مجموعه ماهواره‌های سنتینل متعلق به آژانس فضایی اروپا است که شامل دو ماهواره دوقولو Sentinel-1A و Sentinel-1B می‌باشد. در این مجموعه، Sentinel-1، یک سنجنده راداری پیشرفته برای تهیه تصاویر سطح زمین در روز و شب و تمامی شرایط آب و هوایی مجهز شده است. سنجنده SAR باند C این ماهواره در ادامه ماهواره‌های راداری آژانس فضای اروپا یعنی ERS1، ERS2، Envisat و Radarsat قرار دارد. سنتینل-۱ به عنوان یک مجموعه دو ماهواره‌ای که هر یک با فاصله ۱۸۰ درجه از یکدیگر قرار دارند تمام کره زمین را در هر ۶ روز تصویر برداری می‌کنند. ماهواره سنتینل-۱ A در تاریخ سوم آوریل ۲۰۱۴ به فضا پرتاب شده و تا سال ۲۰۱۶ قبل از اینکه ماهواره دوم آن (سری B) به فضا پرتاب شود هر ۱۲ روز کل زمین توسط آن تصویربرداری شده است در جدول (۱) و (۲) مشخصات و ویژگی‌های فنی ماهواره سنتینل A1 و تصاویر مورد استفاده در این تحقیق آورده شده است. همان طور که ذکر گردید سنتینل-۱ در باند C راداری به تصویربرداری از سطح زمین می‌پردازد و در چهار حالت مختلف، تصویربرداری با وضوح قابل قبول تا حد ۵ متری و پوششی در عرض ۴۰۰ کیلومتر را فراهم می‌آورد. مدار قطبی بودن آن و قابلیت قطبش دوگانه این ماهواره باعث تحویل سریع داده‌ها از ماهواره به ایستگاه‌های زمینی گردیده است. این ماهواره از یک رادار با روزنه مجازی برخوردار است که تصاویری با قدرت تفکیک بالا را ارائه می‌دهد. این ماهواره همچنین به گونه‌ای طراحی شده است تا در یک حالت عملیاتی بدون وقفه تصویربرداری از تمام مناطق کره زمین از جمله مناطق ساحلی، راه‌های حمل و نقل و پوشش اقیانوسی در سطح کلان را انجام دهد (سازمان فضایی اروپا، ۲۰۱۷). در این مطالعه برای شناسایی و پایش زمین لغزش‌های حوضه آبریز بالهارود گرمی از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل A1 استفاده شده است. مشخصات تصاویر استفاده شده در جدول زیر ذکر گردیده است.

جدول ۱: مشخصات و ویژگی‌های فنی ماهواره سنتینل A1.

Sentinel-1A April 2014	شروع مأموریت
Soyuz rocket from Kourou, French Guiana	ماهواره‌بر
Polar, Sun-synchronous at altitude of 693 km	مدار
Six days (at equator) from two-satellite constellation	دوره بازگشت
Minimum of seven years	عمر ماهواره
Long 2.8 m, wide 2.5 m, 4 m high with 2×10 m-long solar arrays and a 12 m-long radar antenna	مشخصات فیزیکی
Mass 2300 kg (including 130 kg fuel)	جرم
C-band synthetic aperture radar (SAR) at 5.405 GHz	باند تصویربرداری
Interferometric wide-swath mode at 250 km and 5×20 m spatial resolution Wave-mode images of 20×20 km and 5×5m spatial resolution (at 100 km intervals) Strip map mode at 80 km swath and 5×5 m spatial resolution Extra wide-swath mode of 400 km and 20×40 m spatial resolution	فرمت‌های تصویربرداری
SAR data: to ground stations in Svalbard Norway, Matera Italy, Maspalomas Spain, and Inuvik Canada, and via laser link through EDRS. Telemetry data: transmitted to and from Kiruna Sweden	ایستگاه‌های دریافت کننده
Monitoring sea ice & icebergs, oil spills, marine winds, waves & currents, landuse change, land deformation among others, and to respond to emergencies such as floods and earthquakes	کاربردهای اصلی
www.scihub.copernicus.eu	دسترسی به داده‌ها

جدول ۲: زوج تصاویر انتخابی از سنجده سنتینل

نام اختصاری انتخابی	جهت عبور	مدار	ماهواره	تاریخ تصویر برداری
SLC	نزولی	۱۹۱۵۳	Sentinel-1	۲۰۲۰/۰۸/۲۳
SLC	نزولی	۱۹۱۵۳	Sentinel-1	۲۰۲۲/۰۸/۰۱

نرم افزار مورد استفاده:

✓ نرم‌افزار تخصصی ENVI و SARscape4.4 به منظور پردازش تصاویر ماهواره‌ای راداری به کار گرفته شد.

✓ نرم‌افزار ۱۰.۳ ARCGIS جهت تحلیل‌های مکانی و تهیه نقشه‌های پایه‌ای مورد نیاز استفاده شد.

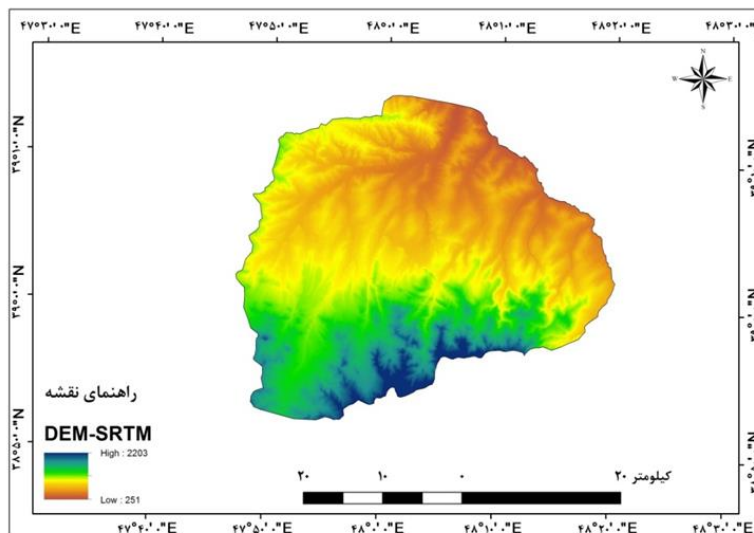
✓ نرم افزار تخصصی ENVI

نتایج و یافته‌ها

نتایج حاصل از تداخل سنجی راداری

تصویر مدل رقومی ارتفاعی SRTM منطقه مورد مطالعه

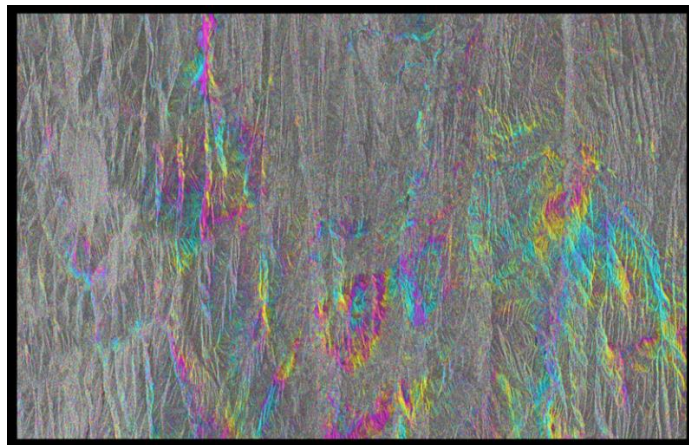
برای تهیه نقشه مدل رقومی ارتفاعی می توان از دو تا تصویر ماهواره‌ای با قدرت تفکیک مکانی متفاوت استفاده کرد که عبارت است از : aster با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر و SRTM: با قدرت تفکیک مکانی ۹۰ متر. در این پژوهش از تصویر ماهواره‌ای SRTM برای تهیه مدل رقومی ارتفاعی محدوده موردنظر استفاده شد. در این پژوهش، هدف از تهیه تصویر dem، فرآیند تعدیل اثر توپوگرافی منطقه مورد مطالعه می باشد که هدف از تعدیل اثر توپوگرافی نیز، پایش و یافتن تغییر شکل زمین است. شکل (۲) تصویر مدل رقومی ارتفاعی زمین محدوده موردنظر را نمایش می دهد. که در این تصویر کمترین ارتفاع از ۲۵۱ شروع شده و بیشترین ارتفاع ۲۲۰۰ متر می باشد. لازم به ذکر است که هرچه dem دقیقتر باشد ۱- نتایج بدست آمده دقیقتر می باشد، در واقع تصحیح توپوگرافی دقیقتر انجام می شود. ۲- ابهام ارتفاعی که در خط مبنا محاسبه می شود با کمترین ارتفاع تصویر dem جمع می شود که نشاندهنده این است که تا چه ارتفاعی ابهام ارتفاعی وجود دارد.



شکل (۲): تصویر مدل رقومی ارتفاعی SRTM محدوده مورد مطالعه.

اینترفروگرام

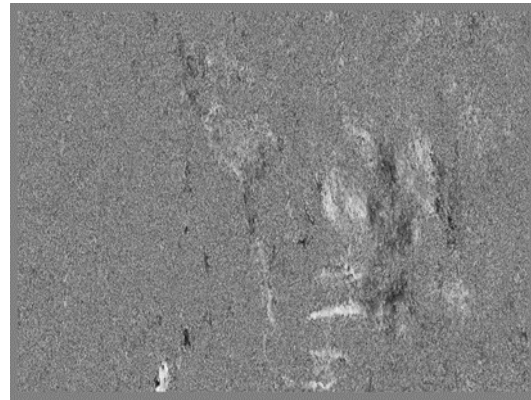
برای ساخت اینترفروگرام حقیقی از تصویر اصلی و تصویر وابسته استفاده می‌شود، همچنین برای ساخت اینترفروگرام مصنوعی از تصویر اصلی و وابسته و dem استفاده می‌شود. به عبارتی دیگر slc در واقع ترکیب power و phase در تصاویر راداری می‌باشد جهت تهیه اینترفروگرام نیاز به خط مبنای کوچک داشتیم که ترجیحاً دو رقمی بوده است. در خروجی پردازش انجام شده، فایل‌هایی با پسوند مختلف، sirdm, shp, dint, int, tif, sint, pwr, hdr... ایجاد شده است که در فایل با پسوند int اثر توپوگرافی وجود دارد اما در فایل با پسوند dint اثر توپوگرافی حذف شده است. در این پژوهش برای ادامه روند پردازش از فرمت dint استفاده خواهد شد، زیرا هم اثر توپوگرافی حذف می‌شود، و به تبع آن خطای ramp از تصویر برداشته می‌شود. قابل ذکر است که خطای ramp در اثر لرزش ژیرسکوپ، به دلیل اثر توپوگرافی و ایراد در سکوی حمل‌سنگنده ایجاد می‌شود. در شکل (۳) نقشه اینترفروگرام محدوده موردنظر نشان داده شده است. برای محاسبه میزان زمین‌لغزش اتفاق افتاده در روی منطقه اگر بخواهیم از روی فرینچ‌ها محاسبه کنیم بدین صورت خواهد بود که دو نقطه‌ای که در یک طیف رنگی قرار دارند اگر این دو نقطه در مسیر خود از هیچ رنگ دیگری عبور نکند میزان جابجایشان به یک اندازه خواهد بود، هر سیکل ۳۶۰ درجه معادل نصف طول موج است. هر فرینچ یک لوپ کامل رنگ به سمت رادار و یا در خلاف جهت رادار است. اگر در تصویر بعد رنگ زرد، رنگ صورتی باشد نشان‌دهنده زمین‌لغزش خواهد بود و اگر بعد رنگ زرد صورتی نباشد، بالآمدگی را نشان می‌دهد. مناطقی که سیاه رنگ باشد منطقه ناهمدوس است و این منطقه ارزش پیکسلی ندارد (جامع، ۱۳۹۹: ۸۶).



شکل ۳: نقشه اینترفروگرام فیلتر شده محدوده مورد مطالعه.

انجام عملیات فیلتر بر روی تداخل نگار تفاضلی

بعد از تهیه اینترفروگرام، تصویر بدست آمده را چون امکان دارد دارای نویزهایی باشد فیلتر می‌کنیم. در این قسمت برای حذف اثر نویز، باید یک فیلتر تطبیقی بر روی اینترفروگرام اعمال شود. اندازه پنجره مربوط به این فیلتر باید به گونه‌ای باشد که حین نرم کردن اینترفروگرام به منظور کاهش اثر نویز، اطلاعات موجود در آن‌ها نیز حفظ شود. بنابراین با اعمال فیلتر، درجه همبستگی اینترفروگرام‌ها تا حد زیادی افزایش می‌یابد که موجب کاهش خطا در مرحله بازیابی فاز می‌شود. به عبارت دیگر فیلتر کردن اینترفروگرام تطبیق داده شده را قادر می‌سازد برای تولید یک محصول خروجی با نویز فاز کاهش یابد. در این پژوهش به دلیل اینکه فیلتر گلداشتاین نتیجه بهتری را ارائه می‌دهد، استفاده شده است. بعد از انجام فیلتر گلداشتاین، در نهایت، تصویر ایجاد شده دارای فرمت‌های مختلفی خواهد بود که عبارت است از: `fint, cc, pwr_fil` که فرمت `fint` همان اینترفروگرام فیلتر شده خواهد بود. اگر همین فرمت باز شود شامل سیکل‌های رنگی خواهد بود که فرینچ نامیده می‌شود. برای بهبود کیفیت و فیلتر کردن تداخل نگارهای تفاضلی تهیه شده در مرحله پیشین، از فیلتر گلداشتاین استفاده شد، استخراج گردید. با اعمال فیلتر گلداشتاین تداخل نگار تفاضلی فیلتر شده و همچنین تصویر همدوسی به دست می‌آید. شکل (۴) و (۵) تصویر تداخل نگار به دست آمده را قبل از اعمال فیلتر و پس از اعمال فیلتر نمایش می‌دهد.



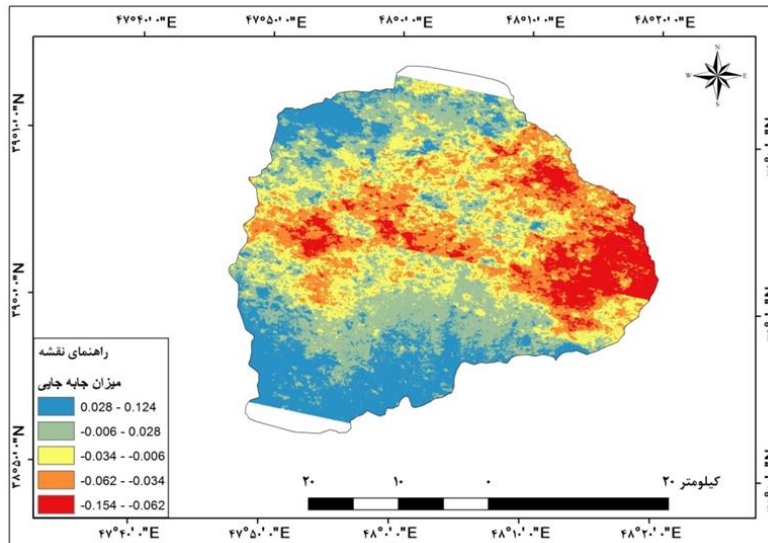
شکل ۵: تصویر تداخل نگار پس از اعمال فیلتر گلدشتاین.

شکل ۴: تصویر تداخل نگار قبل از اعمال فیلتر

گلدشتاین.

نتایج بدست آمده از روش تکنیک تداخل سنجی تفاضلی راداری (DInSAR)

با مطالعه نحوه و امکان وجود جابه جایی در سطح زمین میتوان به برآورد پارامترهای تاثیر گذار در فرایند جابه جایی زمین دست یافت و در مدلسازی ژئوفیزیکی و تعیین راهکارهای لازم جهت مقابله با حرکات دامنه‌ای به کار گرفت. در میان تمام روش‌های زمینی و فضایی اندازه‌گیری تغییرات سطح زمین، تکنیک تداخل سنجی راداری به عنوان ابزار مفید و بهترین روش شناخته شده است. بعد از انجام دادن مراحل پردازش رادار به روش DInSAR، نتایج کار بصورت نقشه نهایی زمین لغزش تهیه گردید. لازم به ذکر است چون بازه زمانی تصاویر مربوط به فصل گرم و خشک سال می‌باشد بنابراین تصاویر فاقد پوشش برف و ابر می‌باشد دارای نتایج قابل قبولی می‌باشد شکل (۶) میزان جابه‌جایی زمین را در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد. نقشه نهایی به دست آمده نشانگر شدت و میزان جابجایی به ازای هر پیکسل در واحد متریک می‌باشد که به میلیمتر، سانتیمتر و .. این جابجایی قابل نمایش است. در نقشه‌های تهیه شده مقادیر مثبت جابجایی مربوط به بالا آمدگی زمین و به عبارت دیگر حرکت سطح زمین به سمت دید راداری و مقادیر منفی بیانگر زمین لغزش و یا دور شدن سطح زمین از سنجنده در راستای دید راداری است. در نقشه کلاس بندی شده شکل شماره (۶)، (۷) و جدول (۳) تهیه شده مقادیر مثبت جابجایی مربوط به بالا آمدگی زمین و به عبارت دیگر حرکت سطح زمین به سمت دید راداری و مقادیر منفی بیانگر زمین لغزش و یا دور شدن سطح زمین از سنجنده در راستای دید راداری است.



شکل ۶: نقشه جابه‌جایی کلاس‌بندی شده محدوده مورد مطالعه

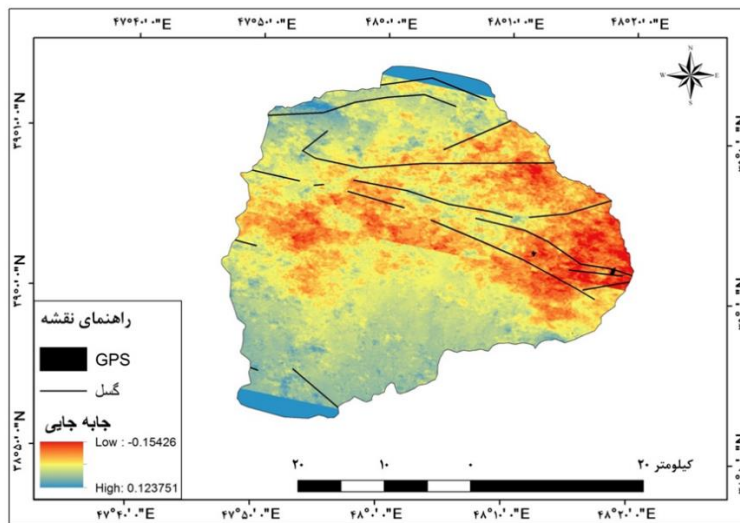
با توجه به شکل ۶، جدول ۳ میزان جابه‌جایی کلاس‌بندی شده طبقه اول محدوده مورد مطالعه مربوط به کلاس اول ($-0/062$ تا $-0/154$) که در شکل بالا با رنگ قرمز مشخص شده است حدود $124/48$ کیلومتر مربع از مساحت محدوده مورد مطالعه را در بر گرفته است. مقدار متوسط زمین‌لغزش $-0/092$ سانتی‌متر می‌باشد. همچنین در کلاس دوم ($-0/034$ تا $-0/062$) که با رنگ نارنجی مشخص شده است. مقدار متوسط زمین‌لغزش $-0/028$ سانتی‌متر می‌باشد حدود $253/07$ کیلومتر مربع از مساحت محدوده مورد مطالعه را در بر گرفته است. $253/07$.

کلاس پنجم ($0/124$ تا $0/028$) که با رنگ آبی پررنگ مشخص شده مقدار متوسط بالا آمدگی آن $0/096$ سانتی‌متر است $257/28$ کیلومتر مربع از مساحت منطقه را در بر گرفته است. بیشترین بالا آمدگی مربوط به این کلاس می‌باشد. کلاس چهارم ($0/028$ تا $-0/006$) که با رنگ آبی کم‌رنگ مشخص شده مقدار متوسط بالا آمدگی آن $0/022$ سانتی‌متر می‌باشد و حدود $351/72$ کیلومتر مربع از مساحت کل منطقه را در بر گرفته است.

جدول ۳: جابه‌جایی کلاس‌بندی شده محدوده مورد مطالعه

کلاس	نام کلاس	مقدار متوسط جابجایی	مساحت به کیلومتر	درصد
اول	-۰/۱۵۴ تا -۰/۰۶۲	-۰/۰۹۲	۱۲۴/۴۸	۹/۷۴
دوم	-۰/۰۶۲ تا -۰/۰۳۴	-۰/۰۲۸	۲۵۳/۰۷	۱۹/۷۹
سوم	-۰/۰۳۴ تا -۰/۰۰۶	-۰/۰۲۸	۲۹۶/۳۰	۲۳/۱۷
چهارم	-۰/۰۰۶ تا ۰/۰۲۸	۰/۰۲۲	۳۵۱/۷۲	۲۷/۵۰
پنجم	۰/۰۲۸ تا ۰/۱۲۴	۰/۰۹۶	۲۵۷/۲۸	۲۰/۱۲
			۱۲۷۸/۸۷	۱۰۰

بعد از تعیین میزان زمین‌لغزش برای زوج تصویر مورد نظر، میزان زمین‌لغزش رخ داده در منطقه مطالعاتی در بازه زمانی ۲۰۲۰ و ۲۰۲۲ مشخص گردید همچنین برای مطالعه بیشتر، به بررسی داده‌های ایستگاه‌های دائم GPS واقع در منطقه مورد مطالعه، پرداخته شده است. با توجه به نتیجه به دست آمده از تحلیل تصاویر راداری که در شکل شماره (۷) و اطلاعات تکمیلی آن در جدول شماره (۳) ارائه شده است، تغییر سطح جابه‌جایی در منطقه بین ۰/۱۲۴ تا -۰/۱۵۴-سانتیمتر بوده است. مطابق نقشه موجود، بیشترین جابجایی زمین‌لغزش در خلاف جهت دید، -۰/۰۹۲-سانتی‌متر و ۰/۰۲۸-سانتی‌متر می‌باشد که در راستای خطوط گسلی مشاهده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود بیش‌ترین میزان زمین‌لغزش در مرکز حوضه بالهارود می‌باشد و کم‌ترین مقدار مربوط شمال و جنوب می‌باشد. همچنین بیش‌ترین نرخ جابجایی بالآمدگی در منطقه مورد مطالعه ۰/۰۹۶ سانتی‌متر و ۰/۰۲۲ سانتی‌متر در سال و در راستای دید ماهواره به دست آمده است. که قسمت شمالی و جنوبی حوضه بالهارود شهرستان گرمی را در بر گرفته است و با داده‌های GPS که از منطقه برداشت شده است منطبق می‌باشد.



شکل ۷: نقشه نهایی زمین لغزش منطقه مورد مطالعه

بحث و نتیجه گیری

تکنیک تداخل سنجی راداری به عنوان روش کارآمد در اندازه گیری جابه جایی سطح زمین می باشد. به طوری که با استفاده از این فناوری امکان پایش حرکات کوچک سطح زمین به صورت پیوسته، با دقت بالا و در گسترده وسیعی امکان پذیر است (عابدینی و همکاران، ۱۴۰۱). پایه اساسی تحقیق زمین لغزش حوضه بالهارود با استفاده از تکنیک تداخل سنجی تفاضلی راداری به منظور آشکار سازی میزان جابجایی اتفاق افتاده می باشد. در این پژوهش از دو تصویر راداری SAR باند C، سنجنده سنتینل ۱ از نوع A استفاده شد. با استفاده از تصاویر راداری SAR برای این پژوهش از دو زوج تصویر برای پردازش راداری استفاده شده است.

با توجه به نتایجی که گرفته شد می توان گفت که روش اینترفرومتری تفاضلی راداری (DInSAR) روش خوبی برای شناسایی زمین لغزش ها محسوب می شود. به منظور پردازش اطلاعات نیز از نرم افزار SARSCAPE استفاده شده است. بیش ترین میزان زمین لغزش ۰/۱۵۴ سانتیمتر در محدوده مورد مطالعه می باشد که نشان دهنده فعال بودن منطقه از لحاظ زمین لغزش است.

نتایج حاصل از اجرای روش تداخل‌سنجی راداری در منطقه مورد مطالعه در بازه زمانی مورد مطالعه که تصاویر مربوط به سال ۲۰۲۰ و ۲۰۲۲ در منطقه می‌باشد نشان داد که، تغییر سطح جابجایی در منطقه بین ۰/۱۲۴ تا ۰/۱۵۴- سانتیمتر بوده است. مطابق نقشه (۶) و جدول (۳) متوسط نرخ بالآمدگی با بیشترین نرخ جابجایی بالآمدگی در منطقه مورد مطالعه ۰/۰۹۶ سانتی‌متر و ۰/۰۲۲ سانتی‌متر در سال و در راستای دید ماهواره به‌دست آمده است که قسمت شمالی و جنوبی حوضه بالهارود شهرستان گرمی را در بر گرفته است. متوسط مقدار زمین‌لغزش با میزان ۰/۰۹۲- و ۰/۰۲۸- در قسمت مرکزی منطقه مشاهده می‌شود. با توجه به انطباق نزدیک نتایج حاصل از روش تداخل‌سنجی راداری با مقدار جابه‌جایی محاسبه شده از داده‌های GPS، می‌توان اذعان داشت که روش تداخل‌سنجی راداری روشی مناسب به‌منظور مطالعه تغییرات جابجایی سطح زمین می‌باشد.

نتایج حاصل از برداشت گسل‌های سطحی در بازدید میدانی از منطقه بالهارود نشان‌دهنده انطباق زمین‌لغزش‌های ایجاد شده و خطوط گسلی در محدوده مورد مطالعه به ویژه در مرکز منطقه مورد مطالعه می‌باشد.

منابع

- ۱- آزادی، ف (۱۳۹۴)، پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش در حوضه‌ی آبخیز نوران‌چای با استفاده از مدل ANP، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل
- ۲- احمدزاده، ح (۱۳۹۳)، رفتارسنجی فعالیت زمین‌لغزش‌ها با استفاده از تکنیک‌های تداخل‌سنجی SAR (مطالعه موردی: حوضه‌ی آبریز قطورچای)، رساله دکتری، رشته ژئومورفولوژی، دانشکده‌ی جغرافیا و برنامه‌ریزی، دانشگاه تبریز
- ۳- حقیقت مهر، پ (۱۳۸۹)، مطالعه فرونشست سطح زمین ناشی از استخراج آب‌های زیرزمینی و چاه‌های نفتی به کمک تداخل‌سنجی راداری، پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته نقشه‌برداری-سنجش از دور، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
- ۴- جامع، م (۱۴۰۰)، شناسایی و پایش ناپایداری دامنه‌ای حوضه رودخانه نیرچای با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، رشته سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشگاه محقق اردبیلی

- ۵- روستایی، ش؛ روستایی، م؛ شریفی کیا؛ یاراحمدی، ج (۱۳۹۲)، کاربرد تداخل سنجی تفاضلی راداری در شناسایی و پایش زمین لغزش‌ها، مطالعه موردی: حوضه‌ی آبخیز گرم‌چای میانه، نشریه مهندسی و مدیریت آبخیز، دوره‌ی ۵، شماره‌ی ۳، صص ۱۹۸-۱۹۰
- ۶- شیرانی، ک (۱۳۹۲)، شناسایی، پایش و سنجش خطرپذیری زمین لغزش مبتنی بر تکنیک تصاویر ماهواره‌ای رادار (مطالعه موردی: ارتفاعات دنای زاگرس)، پایان‌نامه دکتری رشته جغرافیای طبیعی، گرایش ژئومورفولوژی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه‌ریزی، دانشگاه اصفهان
- ۷- شیرانی، ک و خوش باطن، م (۱۳۹۵)، بررسی و پایش زمین لغزش فعال با استفاده از روش تداخل سنجی تفاضلی راداری (مطالعه موردی: زمین لغزش نقل، سمیرم)، فصلنامه‌ی کوآترنری ایران، علمی-پژوهش، ۲، ۱: ۶۵-۵۳
- ۸- صالحی، سعدی و معماری، گلان (۱۳۹۸)، پهنه بندی مناطق مستعد زمین لغزش شهرستان سروآباد، جغرافیا و روابط انسانی، ۲(۳)، ۱۵۵-۱۳۷
- ۹- عوضیان، ف (۱۳۹۶)، پهنه بندی خطر زمین لغزش شهرستان اسلام آباد غرب به روش ANP و ارزیابی سکونتگاه‌های در معرض خطر، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه رازی

10-Castaneda, C., Gutierrez, F., Manunta, M., Galve, J.P, 2009. DInSAR measurements of ground deformation by sinkholes, mining subsidence, and landslides, Ebro River, Spain. *Earth Surface Process and Landforms* 34, 1562–1574

11-Confuorto, P., Di Martire, D., Infante, D., Novellino, A., Papa, R., Calcaterra, D., & Ramondini, M. 2019. Monitoring of remedial works performance on landslide-affected areas through ground-and satellite-based techniques. *Catena*, 178, 77-89

12-Hooper, A., Bekaert, D., Spaans, K., Arkan, M, 2012. Recent advances in SAR interferometry time series analysis for measuring crustal deformation, elsevier, *Tectonophysics*, 514-517, p 1–13

13-Intrieri, E., Raspini, F., Fumagalli, A., Lu, P., Del Conte, S., Farina, P., Casagli, N. 2018. The Maoxian landslide as seen from space: detecting precursors of failure with Sentinel-1 data. *Landslides*, 15(1),123-133

14-Laurence C. S, 2002. Emerging Application of Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) in Geomorphology and Hydrology, *Annals of the Association of American Geographers*, 92, pp 359-398

15-Roering, J.L., Stimely, B.H., Mackey, and Schmidt, D.A, 2009. Using DInSAR, airborne LiDAR 50., and archival air photo to quantify landsliding and sediment transport, *Geophys. Res. Lett.* 36L19402, doi:10.1029/2009GL04307

16-Solari, L., Barra, A., Herrera, G., Bianchini, S., Monserrat, O., Béjar-Pizarro, M., Moretti, S. 2018. Fast detection of ground motions on vulnerable elements using Sentinel-17-InSAR data. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 9(1), 152-174

18-Samsonov S.V, 2007. Integration of Differential InSAR and GPS measurements for studying of surface deformation, PhD thesis in Faculty of Graduate Studies The University of Western Ontario London, Ontario, Canada, pp.176