

شناسایی تغییرات حاصل از رخداد زمین لغزش با استفاده از تصاویر راداری (منطقه مطالعاتی: روستای تخت استان گلستان)

الناز علی اصل خیابانی^{۱*}، محمد جواد ولدان زوج^۲، مهدی معتنق^۳

^۱ دانشجوی دکتری فتوگرامتری-دانشکده مهندسی نقشه‌برداری-دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

Elnaz.khiabani073@gmail.com

^۲ استاد دانشکده مهندسی نقشه‌برداری- دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

Valadanzouj@kntu.ac.ir

^۳ استاد مرکز علوم و تحقیقات زمین دانشگاه لایپنیتز هانوفر آلمان

Motagh@gfz_postdam.de

(تاریخ دریافت: دی ۱۴۰۱، تاریخ تصویب: مهر ۱۴۰۲)

چکیده

پدیده‌های طبیعی در جهان مانند زلزله و بارندگی شدید که گاهی اوقات با طوفان‌های باد ترکیب می‌شوند، می‌توانند سبب بروز رویداد زمین لغزش گردند. این زمین لغزش‌ها در یک ناحیه می‌توانند باعث خرابی چندین بخش یا منطقه گردیده و خسارات قابل توجهی به زیرساخت‌های طبیعی و انسانی وارد کنند. برای اندازه‌گیری تغییرات بوجود آمده ناشی از این پدیده در سطح زمین و تولید نقشه آسیب ناشی از آن، روش‌های مختلف ژئودتیکی و غیرژئودتیکی وجود دارد. روش‌های ژئودتیکی به دلیل محدودیت‌هایی همچون صرف زمان و هزینه بالا و عدم توانایی تعیین وسعت و الگوی فضایی مناطق آسیب‌دیده برای تهیه نقشه تغییرات ناشی از زمین لغزش مناسب به نظر نمی‌رسند. بنابراین، بایستی به سراغ روش‌های غیرژئودتیکی برویم. امروزه کاربرد تکنیک‌های سنجش از دور در مطالعات ناپایداری دامنه‌ها و بررسی تغییرات سطح زمین بسیار مورد توجه قرار گرفته‌است. تصاویر راداری به دلیل قدرت تفکیک مکانی بالا، دید وسیع، امکان برداشت در هر نوع شرایط آب و هوایی، امکان برداشت در طول شب، فرکانس بالای مشاهدات مکانی و زمانی و دقت قابل قبول به عنوان یک ابزار مناسب برای این منظور مطرح گردیده‌اند. علاوه بر این، روش‌های مختلفی برای استخراج اطلاعات از این نوع داده‌ها وجود دارد که اغلب آن‌ها نیاز به داده‌های اولیه حجیم، انجام پردازش‌های سنگین و بسیار زمان‌بر دارند، اما ما در این تحقیق سعی بر آن داریم که با استفاده از تصاویر راداری سنجنده Sentinel-1A در بستر پردازشی Google Earth Engine (GEE) با استفاده از کمترین زمان ممکن به تولید نقشه زمین لغزش دست یابیم. در این تحقیق با استفاده از بررسی تغییرات بوجود آمده در بخش سیگمانات (σ°) تصاویر راداری قبل و بعد از زمین لغزش و با ترکیب تصاویر در دو حالت ASC و DSC به شناسایی مناطق آسیب دیده ناشی از زمین لغزش در منطقه تخت استان گلستان می‌پردازیم. با داشتن دو تصویر قبل از وقوع زمین لغزش و دو تصویر بعد از وقوع آن در دو حالت بالا و پایین گذر، می‌توان تصویر I_{ratio} را در دو حالت ADC و DSC تولید نمود. سپس، برای تولید نقشه I_{ratio} نهایی، می‌توان بین تصاویر I_{ratio} در حالت بالاگذر و پایین‌گذر میانگین‌گیری کرده و اطلاعات این دو گذر را بایکدیگر ترکیب نمود. در نهایت با تعیین یک حد آستانه مناسب، می‌توان مناطقی که دچار زمین لغزش شده‌اند را شناسایی کرد. به منظور ارزیابی دقت، از آنجاکه هیچ داده زمینی از منطقه مورد نظر وجود نداشت، نقشه زمین لغزش تولید شده با تصاویر اپتیک سنجنده Sentinel-2 مقایسه شده و نتایج حاصل نشان‌دهنده مطابقت بالای این دو دسته داده و دقت مناسب روش پیشنهادی می‌باشد.

واژگان کلیدی: شناسایی زمین لغزش، تصاویر سیگمانات، بالاگذر، پایین‌گذر، Sentinel-1A، Google Earth Engine

* نویسنده رابط

۱- مقدمه

طبق گزارش مشترک مرکز تحقیقات اپیدمیولوژی بلایا، پایگاه رویدادهای اضطراری و دفتر کاهش خطر بلایای سازمان ملل متحد، بین سالهای ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۷ به دلیل بلایای مرتبط با آب و هوا و ژئوفیزیک، ۱,۳ میلیون نفر کشته و ۴,۴ میلیارد نفر دیگر مجروح، بی خانمان، آواره و یا نیازمند کمکهای فوری شدند و کشورهای آسیب دیده از بلایا نیز خسارات اقتصادی مستقیمی به ارزش ۲,۹۰۸ میلیارد دلار گزارش کردند. این منابع همچنین نشان می دهند که بلایای مرتبط با زمین لرزه، زمین لغزش و جابجاییهای سطح زمین، ۱۳,۲ درصد از بلایای ذکر شده را در بین سالهای ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۷ شامل می شوند که در مجموع ۱۳۶ میلیون نفر انسان را تحت تاثیر قرار داده اند [۱].

زمین لغزش که یکی از این بلایا نام برده شده است، پدیده ای است که از پایین افتادن یا حرکت یکپارچه و اغلب سریع حجمی از مواد رسوبی در امتداد دامنه ها بنا به عوامل متعدد رخ می دهد. حرکت نزولی در رانش زمین ممکن است بسیار کند رخ دهد (تنها چند میلی متر در سال) یا با سرعت بسیار بروز کند و تاثیرات مصیبت باری به جای بگذارد [۱]. رانش زمین حتی می تواند در بستر دریا و زیر آب رخ دهد و امواج جزر و مدی به وجود آورد که باعث تخریب در مناطق ساحلی شود. رانش زمین از جمله بلایای طبیعی است که همه ساله تلفات و خسارات فراوانی در نقاط مختلف کره زمین بر جای می گذارد. اکثراً از این پدیده به عنوان یکی از بلایای طبیعی نام برده می شود اما گاهاً دخالت های انسان در طبیعت نیز باعث بروز یا تشدید این پدیده می گردد. پدیده مذکور از نظر زمین شناسی جزئی به نظر می رسد لیکن از نظر تلفات انسانی و خسارات به عنوان یک فاجعه به شمار می آید. عوامل طبیعی متعددی از جمله بارش، زلزله، سیل، آتشفشان، خشکی، طوفان، از بین رفتن پوشش گیاهی، ناپایداری خاک، نوع خاک، شیب زمین، آب های زیرزمینی و ... بطور مستقیم یا غیر مستقیم می تواند باعث تحرک قسمت هایی از سطح زمین شوند [۲]. همچنین، عوامل غیرطبیعی یا به عبارتی فعالیت های انسانی که منجر به حساس شدن شیب ها و وقوع زمین لغزش می شوند عبارتند از: ساخت و ساز در دامنه ها، استخراج غیراصولی از معادن، راه سازی به خصوص در مناطق

کوهستانی، تغییر کاربری اراضی، برش تپه ها به منظور استخراج مصالح و ...

لرزم بحث و تحقیق در خصوص این پدیده مخرب، پهنه بندی خطر زمین لغزش، شناسایی مناطق آسیب دیده از زمین لغزش و امداد رسانی به این مناطق کاملاً احساس می شود. می دانیم که در صورت وقوع زمین لغزش، تنها یک ناحیه کوچک تحت تاثیر قرار نخواهد گرفت بلکه می تواند گستره وسیعی از یک منطقه را دربر بگیرد، به همین دلیل روش های سنتی ژئودتیکی از جمله مشاهدات زمینی از طریق برداشت های GPS^۱، توتال استیشن، لیزر اسکنر، نقشه برداری زمینی و ترازبایی و ... پاسخگوی نیاز ما نخواهند بود، چراکه مشاهداتی که از طریق این روش ها صورت می گیرند از جمله ایستگاه های GPS و نقشه برداری زمینی، اندازه گیری های دقیق و پیوسته ای را در نقاط محدودی از مناطق ارائه می دهند؛ بنابراین، هیچ یک از این روش ها، توانایی تعیین وسعت و الگوی فضائی مناطقی که تحت تاثیر رانش زمین قرار گرفته اند را ندارند. از طرف دیگر، تکرار انجام هر کدام از این روش ها به ویژه هنگامی که برای منطقه وسیعی مورد نظر باشد، بسیار پرهزینه و زمان بر خواهد بود. وجود چنین محدودیتهایی همواره از چالش های اساسی محققان در ارتباط با اندازه گیری های دقیق و پایش فضایی تغییرات سطح زمین محسوب می شود. همچنین، لازم به ذکر است که در شرایط وقوع بحران، به منظور امداد رسانی در کوتاه ترین زمان ممکن، بایستی در کمترین مدت زمان، نقشه مناطق آسیب دیده در دست نیروهای امداد رسانی قرار بگیرد؛ بنابراین، روش های سنتی و زمان بر قدیمی دیگر کاربردی ندارند [۳]. به همین دلیل به دنبال روش هایی کم هزینه و بسیار سریع برای تولید نقشه زمین لغزش می باشیم. حرکت زمین لغزش را می توان با استفاده از داده های سنجش از دوری مورد مطالعه و تحلیل قرارداد. ابزارهای سنجش از دوری بر استفاده از سنسورهای فعال^۲ یا غیرفعال^۳ که سیگنال بازگشتی از سطح زمین لغزش یا اجسام درگیر در حرکت زمین لغزش را دریافت و ضبط می کنند، متکی هستند. با توجه به قابلیت های بی نظیر تصاویر راداری که جزء سنسورهای فعال هستند و محدودیتهای موجود در تصاویر اپتیک که از جمله سنسورهای غیرفعال به شمار می آیند [۴]، هدف اصلی این تحقیق بر پایه استفاده از

۲ Active

۳ Passive

۱ Global Positioning System

تصاویر راداری قرار گرفت. تصاویر راداری به دلیل قدرت تفکیک مکانی بالا، دید وسیع، امکان برداشت در هر نوع شرایط آب و هوایی، امکان برداشت در طول شب، فرکانس بالای مشاهدات مکانی و زمانی و دقت قابل قبول به عنوان یک ابزار مناسب برای این منظور مطرح گردیده‌اند. یکی از موارد مهم در چنین مطالعاتی، انتخاب نوع تصویر راداری جهت مطالعه زمین لغزش می‌باشد. تصاویر راداری ماموریت ماهواره Sentinel-1 که شامل دو ماهواره Sentinel-1A و Sentinel-1B است، توسط سازمان فضایی اروپا توسعه و طراحی شده‌است و از سال ۲۰۱۴ آغاز به کار کرده‌است. این ماموریت که در باند C (۵,۴۰۵ گیگاهرتز) تصویربرداری می‌کند، با مشاهدات راداری پیوسته (بازدید مجدد تا حداقل ۶ روز) و پوشش وسیع با وضوح مکانی تا ۲۰ متر، امکان دسترسی منظم و رایگان به داده‌های راداری و در نتیجه طیف وسیعی از برنامه‌های کاربردی را فراهم کرده‌است [۱]. بنابراین، در این مطالعه نیز داده مورد استفاده جهت دستیابی به هدف، داده‌های این سنجنده خواهد بود. علاوه بر داده مورد استفاده، روش استخراج اطلاعات از داده‌های ورودی نیز نقش بسیار مهمی در دقت نتایج بدست آمده ایفا خواهد کرد. به منظور انتخاب روش مناسب برای تولید نقشه آسیب ناشی از زمین لغزش، در بخش بعد به مطالعه و بررسی تحقیقات پیشین موجود در این زمینه خواهیم پرداخت تا بتوان بر اساس نتایج بدست آمده و دقت‌های حاصل از آن‌ها، روشی دقیق و مناسب انتخاب نماییم.

۲- پیشینه تحقیق

امروزه تصاویر راداری به دلیل قدرت تفکیک مکانی بالا، دید وسیع، امکان برداشت در هر نوع شرایط آب و هوایی، امکان برداشت در طول شب، فرکانس بالای مشاهدات مکانی و زمانی و دقت قابل قبول به عنوان یک ابزار مناسب برای استخراج اطلاعات از سطح زمین مطرح گردیده‌اند. روش‌های مختلفی برای استخراج اطلاعات از این نوع داده‌ها وجود دارد که در تمامی این مطالعات مبنای کار یکی از دو پارامتر دامنه یا فاز بوده‌است. در مقاله‌ای که Mondini و همکاران در سال ۲۰۲۱ بر روی اکثر مطالعات انجام شده برای تولید نقشه زمین لغزش

از سال ۱۹۹۵ تا ۲۰۲۰ انجام دادند که شامل ۵۵ مقاله از ۲۶ مجله مختلف بود [۵]، مشخص شد که تصاویر SAR^۱ در هر شرایط آب و هوایی و اقلیمی بهترین نتایج را نسبت به سایر منابع داده حاصل می‌کنند. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که بهترین منبع برای تولید نقشه زمین لغزش با صرف زمان و هزینه اندک، تصاویر راداری می‌باشند؛ لذا منبع اصلی این تحقیق برای دستیابی به نقشه زمین لغزش، تصاویر SAR قرار خواهد گرفت. همچنین علاوه بر منبع داده، روش تولید نقشه نیز بسیار مهم است، بر اساس مطالعات انجام گرفته که در جدول ۱ آورده شده‌اند، مشخص شد که در روش استفاده از فاز به دلیل نیاز به تعداد بالای تصاویر و صرف زمان بسیار بیشتر جهت پردازش آن‌ها، سرعت عمل مورد نیاز ما بدست نخواهد آمد، همچنین، به منظور اجرای اینگونه روش‌ها، نیاز به سیستم‌های بسیار قوی پردازشی بوده که این امر، یکی دیگر از محدودیت‌های اینگونه روش‌ها می‌باشد. به همین دلیل روش تولید نقشه زمین لغزش در این تحقیق بر اساس استفاده از پارامتر دامنه تصاویر راداری خواهد بود. با توجه به مطالعات صورت گرفته بر روی استفاده از پارامتر دامنه تصاویر راداری به منظور تولید نقشه تغییرات زمین لغزش که در جدول ۱ آورده شده‌است بایستی خاطر نشان کرد که در تمامی این روش‌ها نیاز به صرف زمان برای دانلود تصاویر از سایت‌های مربوطه می‌گردد، همچنین، پس از دانلود این تصاویر، مرحله زمانبر بعدی انجام پیش‌پردازش‌های اولیه بر روی تمامی تصاویر می‌باشد که همین دو مرحله سرعت عمل کلی تولید نقشه را کاهش می‌دهند، به همین دلیل ما به سراغ استفاده از بستر پردازشی GEE رفتیم. در این بستر تمامی تصاویر راداری سنجنده Sentinel-1A بصورت پیش پردازش شده در آرشیو موجود می‌باشد، علاوه بر این، نیازی به دانلود این تصاویر نمی‌باشد و می‌توان با فراخوانی کردن تصاویر موردنظر، عملیات‌های مدنظر را بر روی آن‌ها اعمال نمود. مزیت دیگر این روش، عدم نیاز به وجود سیستم‌های قدرتمند پردازشی و عدم نیاز به فضای داخلی یا خارجی جهت ذخیره سازی اطلاعات می‌باشد. پیرو مطالب ذکر شده مشخص است که سرعت این روش نیز نسبت به سایر روش‌ها بیشتر می‌باشد چراکه ما برای تولید نقشه نهایی بصورت مجازی از یک ابر سیستم مجازی استفاده می‌نماییم.

^۱ Synthetic Aperture Radar

جدول ۱. مطالعات پیشین صورت گرفته و مزایا و معایب آنها

مزایا	معایب	روش	نویسندگان	داده مورد استفاده
محاسبه میزان جابجایی دقت بالا	تعداد زیاد تصاویر زمانبر بودن	روش PSI	Bardi و همکاران [۶]	داده فاز
	نیاز به نرم افزارهای حرفه‌ای	روش PSI	Herrera و همکاران [۷]	
	تراکم پایین نقاط PS	روش SBASS	Zhang و همکاران [۸]	
	محاسبه mean velocity در بازه زمانی تصاویر اخذ شده	روش StaMPS	Sun و همکاران [۹]	
امکان تولید نقشه تغییرات با حداقل دو یا سه تصویر راداری سرعت و دقت مناسب عدم نیاز به فضای ذخیره‌سازی بالا عدم نیاز به سیستم‌های پردازشی قوی	عدم محاسبه میزان جابجایی تفسیر مشکل بعضی پارامترها حساسیت نسبت به آسیب‌های شدید نیاز به پیش پردازش تصاویر خام راداری	تولید نقشه اختلاف ارتفاع و اختلاف دامنه تصویر قبل و بعد از وقوع زمین لغزش تولید نقشه تغییرات روشنایی (پارامتر β^0) تولید نقشه Intensity Correlation و Backscattering Coefficient Difference برای تصویر قبل و بعد از زمین لغزش استفاده از پارامتر آلفا، آنتروپی و آنیزوتروپی	Uemoto و همکاران [۱۰] Mondini و همکاران [۱۱] Konishi و همکاران [۱۲] Park و همکاران [۱۳]	SAR داده دامنه

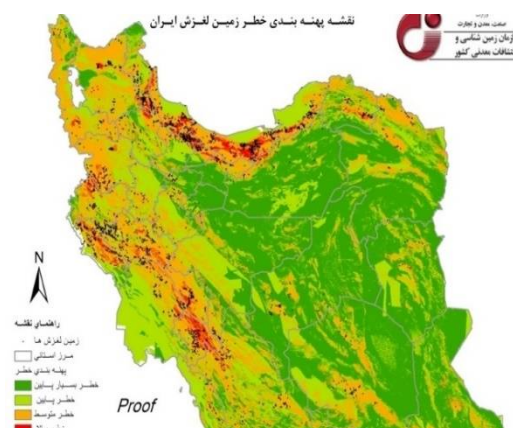
۳- منطقه مطالعاتی

محدوده مطالعاتی مورد نظر در این تحقیق، منطقه تخت با مختصات $37^{\circ} 09' 51''$ شمالی و $55^{\circ} 25' 59''$ شرقی از توابع شهرستان مینودشت در استان گلستان ایران می‌باشد. منطقه تخت دارای تابستان‌های متعادل و مرطوب و زمستان‌های پر بارش می‌باشد که اکثر نزولات به صورت برف در ارتفاعات بروز می‌کند. بارندگی به صورت باران در فصل بهار بعضاً به حدی می‌باشد که در تردد روزانه ایجاد اختلال می‌کند. وجود اینگونه بارندگی‌ها یکی از دلایل وقوع زمین لغزش در این منطقه می‌باشد. علاوه بر بارندگی، وجود گسل‌های متعدد در این منطقه نیز از دیگر عوامل وقوع زمین لغزش در این محدوده می‌باشد [۱۴].

بر اساس ویژگی‌های زمین‌شناسی در استان گلستان، در این منطقه گسل‌های لرزه‌ای بسیاری وجود دارد که می‌توان به گسل آشخانه، گسل خزر یا مینودشت، گسل

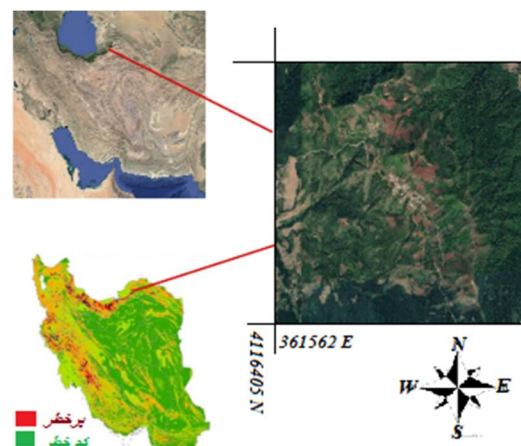
علی‌آباد، گسل تکلکوه، گسل گمیشان و گسل کپه داغ اشاره کرد. فعال‌ترین گسل‌ها در استان گلستان در نواحی جنوبی، از جمله شهرستان رامیان و بخش‌های شرقی و شمال شرقی استان از جمله شهرستان‌های مینودشت و گالیکش می‌باشند که این مناطق جزو مناطق با خطر لرزه‌ای بالا محسوب می‌گردند. بخش‌های غربی و شمال غربی استان از جمله شهرستان‌های کردکوی، بندرترکمن، بندرگز و گمیشان جزو مناطق با خطر لرزه‌ای پایین هستند. طبق نقشه پهنه‌بندی خطر وقوع زمین لغزش که سازمان زمین و اکتشافات معدنی کشور ارائه کرده است، می‌توان مناطق با خطر بالا را شناسایی کرده و بر روی آنها مطالعه نمود. همانطور که پیشتر ذکر شد، منطقه مورد مطالعه در این تحقیق منطقه تخت می‌باشد. این منطقه از توابع شهرستان مینودشت محسوب شده و در جنوب آن قرار دارد، به همین دلیل از ویژگی‌های زمین‌ساختی این منطقه پیروی می‌کند و از همین رو یکی از مناطق مستعد وقوع

زمین لغزش می‌باشد. همچنین، این منطقه بر روی گسل خزرو واقع شده است که می‌تواند خطر وقوع زمین لغزش در این منطقه را افزایش دهد [۱۵].



شکل ۱. نقشه پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در ایران؛ تولید شده توسط سازمان زمین و اکتشافات معدنی کشور (<https://www.irna.ir/news/82952228>)

یکی از این تحرکاتی که سبب بروز زمین لغزش‌های متعدد در منطقه تخت گردید در تاریخ ۲۸ اسفند ۱۳۹۷ (۱۹ March ۲۰۱۹) رخ داد. هدف اصلی این تحقیق شناسایی زمین لغزش‌های به وجود آمده در این بازه زمانی در منطقه مذکور می‌باشد. در شکل ۲ نمایی از این منطقه نشان داده شده است.



شکل ۲. نمای کلی منطقه مطالعاتی (روستای تخت استان گلستان)

۴- داده‌های مورد استفاده

همانطور که در بخش پیشینه تحقیق بیان شد، داده‌های مورد استفاده در این تحقیق تصاویر باند C سنجنده

Sentinel-1A می‌باشد. برای دستیابی به هدف، از یک تصویر قبل و یک تصویر بعد از وقوع زمین لغزش استفاده خواهیم کرد. به منظور افزایش دقت نهایی نتایج، در این تحقیق از ترکیب داده‌های بالاگذر و پایین‌گذر استفاده خواهیم نمود، به عبارت دیگر در روند پردازش از دو تصویر قبل از وقوع زمین لغزش در حالت بالاگذر و پایین‌گذر و دو تصویر بعد از وقوع زمین لغزش در حالت بالا و پایین‌گذر استفاده خواهیم نمود. اطلاعات مربوط به این تصاویر در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲. اطلاعات تصاویر مورد استفاده برای منطقه مطالعاتی در حالت GRD

پلاریزاسیون	گذر	تعداد	تاریخ اخذ تصویر	سنجنده
VH	ASC	2	2019/03/12 2019/03/24	Sentinel-1A
VH	DSC	2	2019/02/22 2019/03/30	Sentinel-1A

۵- مبانی و روند انجام پروژه

هدف اصلی ما در این تحقیق آن است که یک موتور پردازشی سریع و قدرتمند برای پردازش تصاویر Sentinel-1 معرفی کنیم تا بتوان مناطقی که دچار زمین لغزش شده‌اند را به سرعت شناسایی کرد. نکته مهم این است که رویکرد ما نیازی به داندلود حجم زیادی از داده‌ها در یک سیستم محلی یا استفاده از چندین نرم افزار پردازش تخصصی ندارد، چرا که از یک پلتفرم آنلاین رایگان مبتنی بر موتور پردازشی برای داندلود و پردازش تصاویر استفاده خواهیم نمود. این موتور پردازشی که GEE^۱ نام دارد با داشتن بازه زمانی مورد نظر ما، تمامی تصاویر موجود در آرشیو این سنجنده را یافته و پردازش می‌کند، در ضمن ما با استفاده از زبان برنامه نویسی JavaScript در این فضا کار خواهیم کرد. نکته قابل توجه آن است که این موتور پردازشی تنها تصاویر GRD^۲ یا به عبارت دیگر تصویر ۳۵° این سنجنده را تولید نموده و در اختیار کاربران قرار می‌دهد. در ادامه محاسبات مورد نیاز برای دستیابی به تصویر ۵° آورده شده است.

^۳ Backscatter Intensity Coefficient

^۱ Google Earth Engine

^۲ Ground Range Detected

۵-۱- روند تولید تصویر Backscatter intensity coefficient (σ°)

طبق فرمول ۱، میزان σ° رابطه مستقیمی با مقدار روشنایی یا همان β° دارد [۱۶].

$$\sigma^\circ = \beta^\circ \cdot \sin \alpha \quad (۱)$$

در این فرمول α زاویه فرود محلی می باشد.

تصویر β° نیز رابطه مستقیمی با درجه خاکستری (DN) تصاویر راداری دارد. پس می توان گفت که درجه خاکستری رابطه مستقیمی با σ° و β° دارد [۱۶].

$$[DN]^2 = Constant \cdot \frac{\sigma^\circ}{\sin \alpha} = Constant(\alpha) \cdot \sigma^\circ \quad (۲)$$

$Constant(\alpha)$ یک تابع است که بستگی به زاویه فرود محلی دارد و می تواند به صورت زیر بازنویسی گردد [۱۶].

$$Constant(\alpha) = K \cdot \frac{\sin \alpha_{ref}}{\sin \alpha} \quad (۳)$$

K مقدار ثابت کالیبراسیون و α_{ref} زاویه فرود رفرنس است که برابر با 23° درجه است. مقدار پارامتر K بستگی به نوع داده سنجنده و پردازش ها دارد. با توجه به مطالب قبل، میتوان σ° را با فرمول ساده شده زیر نمایش داد [۱۶].

$$\sigma^\circ = \left(\frac{1}{N} \cdot \sum_{i,j=1}^{i,j=N} DN_{ij}^2 \right) \cdot \frac{1}{K} \cdot \frac{\sin \alpha}{\sin \alpha_{ref}} \quad (۴)$$

که N تعداد پیکسل های تصویر در منطقه مورد نظر یا همان AOI، i و j موقعیت پیکسل در راستای Range و Azimuth و همچنین DN_{ij} مقدار درجه خاکستری در پیکسل با موقعیت i و j است. α میانگین زاویه فرود محلی و α_{ref} زاویه فرود رفرنس است.

تصویر σ° را می توان بر اساس Amplitude نیز بازنویسی کرد که در فرمول شماره ۵ آورده شده است [۱۶].

$$\sigma^\circ = \left(\frac{1}{N} \sum_{i,j=1}^{i,j=N} DN_{ij}^2 \right) \frac{1}{K} = \frac{1}{N} \sum A_{ij}^2 \quad (۵)$$

در این فرمول A_{ij} برابر با Amplitude می باشد.

پس از تولید تصویر σ° با هر یک از فرمول های ذکر شده، بایستی همه مقادیر برحسب واحد لگاریتمی دسی بل (dB) ارائه شوند، بنابراین، تصویر نهایی σ° بصورت زیر استخراج خواهد شد [۱۶].

$$\sigma^\circ = 10(\log_{10} \sigma^\circ) \text{ dB} \quad (۶)$$

تصویری که پلتفرم GEE فراهم می کند تصویر σ° ای است که برحسب واحد دسی بل بوده و نویز حرارتی از روی آن حذف شده و همچنین کالیبراسیون رادیومتریک و Orthorectifying بر روی آن ها اعمال شده است. طبق توصیه خود سایت GEE، به منظور حذف پیکسل های کم کیفیت، بایستی پیکسل هایی که مقدار آن ها در تصویر σ° کمتر از -30 دسی بل باشد را حذف نماییم [۱۷].

۵-۲- تولید نقشه I_{ratio}

بررسی تغییرات در میزان Backscatter ماهواره های راداری، می تواند پارامتر مناسبی برای تشخیص تغییرات ناشی از زمین لغزش در سطح زمین شود. به منظور شناسایی تغییرات ایجاد شده ناشی از زمین لغزش، بایستی تصویر Backscatter Coefficient را برای زمان قبل و بعد از وقوع زمین لغزش بدست آوریم و با محاسبه اختلاف این دو تصویر، تصویر I_{ratio} را تولید نماییم که در فرمول ۷ نشان داده شده است [۱۸].

$$I_{ratio} = \sigma_{pre}^0 - \sigma_{post}^0 = 10 \left(\log_{10} \frac{\sigma_{pre}^0}{\sigma_{post}^0} \right) \quad (۷)$$

I_{ratio} می تواند مثبت یا منفی باشد. مقدار مثبت آن نشان دهنده این است که مقدار backscatter در تصویر بعد از وقوع کاهش داشته است. ایجاد تغییرات در backscatter نشان دهنده وقوع زمین لغزش است زیرا زمین لغزش باعث تغییرات عمده در سطح زمین می شود و ویژگی هایی از قبیل بازتاب رادار، هندسه شیب تپه، زبری و خواص دی الکتریک را تغییر می دهند، به همین دلیل مقادیر مثبت این پارامتر می تواند نشانه وقوع زمین لغزش باشد. بر این اساس، مبنای

کار ما تولید تصویر I_{ratio} و شناسایی تغییرات ایجاد شده در این تصویر خواهد بود [۱۸].

نکته‌ای که لازم به ذکر است، این است که با توجه به اینکه یک سری پدیده‌ها از جمله زمین‌های کشاورزی، معادن، جنگل زدایی، سیل و ... باعث کاهش میزان بازتاب در تصاویر راداری می‌شوند، سبب بروز False positive خواهند شد، به همین دلیل بایستی این مناطق را از تصاویر تا حد ممکن حذف کنیم. برای کمک به کاهش false positive، مناطقی را که بعید به نظر می‌رسد با رانش زمین مطابقت داشته باشند (مانند دریاچه‌های کوچک، رودخانه‌ها، سطوح صاف، بالای تپه‌ها) با استفاده از ماسک‌های مبتنی بر Threshold ساخته شده از شیب توپوگرافی و انحنای محاسبه‌شده از مدل رقومی ارتفاعی (۳۰ متر SRTM)^۱ حذف خواهیم نمود. همچنین، از آنجایی که زمین لغزش‌ها معمولاً در دامنه‌های شیب‌دار شروع می‌شوند، شیب‌های کمتر از چند درجه را می‌توان حذف نمود، زیرا این مناطق معمولاً با مکان‌های غیر لغزشی مطابقت دارند. همچنین، با استفاده از داده‌های آبی ذخیره‌شده در لایه NASADEM، توده‌های آبی بزرگ‌تر، از جمله اقیانوس‌ها، برخی دریاچه‌ها و سواحل رودخانه‌ها را شناسایی کرده و از داده مورد نظرمان حذف می‌نماییم.

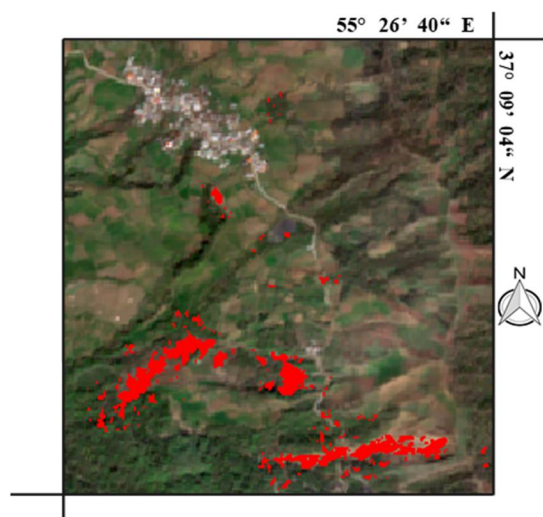
۶- پیاده‌سازی و ارائه نتایج

همانطور که پیشتر ذکر شد، محیط برنامه‌نویسی و موتور پردازشی در این تحقیق، GEE می‌باشد. برای شروع به کار در این محیط، اولین مرحله فراخوانی تصاویر GRD سنجنده Sentinel-1A در بازه زمانی مورد نظر می‌باشد. زمان اخذ تصاویر استفاده شده در این تحقیق در جدول ۲ آورده شده‌است. تصاویر فراخوانی شده همگی پیش پردازش شده و خطاهایی از جمله نویز حرارتی، کالیبراسیون رادیومتریک و ... بر روی آن‌ها اعمال شده‌است. تصویری که در محیط GEE فراخوانی می‌شود، همان تصویر سیگمانات (σ^0) می‌باشد که در بخش ۵-۱ توضیح داده شد. در مرحله اول بایستی پیکسل‌هایی که دارای مقادیر کمتر از ۳۰- دسی بل هستند را از روی این تصاویر حذف نموده تا پیکسل‌های با کیفیت بالا در پردازش‌ها وارد شوند. از آنجا که در این تحقیق می‌خواهیم از ترکیب تصاویر بالاگذر و پایین‌گذر استفاده نماییم، ابتدا تصویر I_{ratio} را در حالت بالاگذر و پایین‌گذر

بصورت جداگانه تولید می‌نماییم. در نهایت به منظور ترکیب اطلاعات این دو گذر، بین تصویر I_{ratio} در حالت بالاگذر و I_{ratio} در حالت پایین‌گذر میانگین‌گیری انجام داده و تصویر $I_{ratioAverage}$ را تولید می‌نماییم.

پس از تولید تصویر $I_{ratioAverage}$ ، بایستی ماسک‌های مربوط به DEM^2 ، مناطق تحت پوشش آب و ... که در بخش ۲-۵ توضیح داده شد را اعمال کنیم تا جلوی بروز هرگونه خطاهای احتمالی گرفته شود.

پس از اعمال موارد ذکر شده بر روی تصویر $I_{ratioAverage}$ ، تقریباً کار ما به پایان رسیده‌است و تنها گام مهم باقی‌مانده، تعیین حد آستانه مناسب برای شناسایی مناطق زمین‌لغزش می‌باشد. در این تحقیق روشی که برای تعیین حد آستانه استفاده شده‌است روش صدک‌گذاری است. در این روش، اگر تمامی مقادیر پیکسل‌های تصویر $I_{ratioAverage}$ را از کوچک به بزرگ به ۱۰۰ بخش تقسیم کنیم، بخش ۹۵ ام و ۱۰۰ ام از این پیکسل‌ها نشان‌دهنده مناطق زمین‌لغزش می‌باشند. به عبارتی کمترین مقدار صدک ۹۵ ام نشان‌دهنده عدد حد آستانه می‌باشد. پیکسل‌هایی که مقادیر بزرگتر یا مساوی با این حد آستانه را داشته باشند به عنوان مناطق وقوع زمین-لغزش شناسایی خواهند شد. شکل ۳، نقشه تولید شده از روش ارائه شده در این تحقیق می‌باشد.



شکل ۳. نقشه مناطق زمین لغزش (نقاط قرمز رنگ، مناطقی هستند که زمین لغزش در آن‌ها رخ داده‌است).

مناطق قرمز رنگ در این شکل، مناطقی هستند که دچار زمین‌لغزش شده و تغییراتی در آن‌ها به وقوع پیوسته‌است که توسط روش پیشنهادی در این تحقیق شناسایی شدند. با

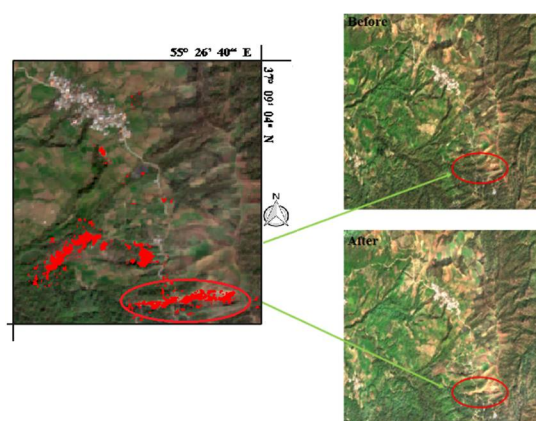
^۲ Digital Elevation Model

^۱ Shuttle Radar Topography Mission

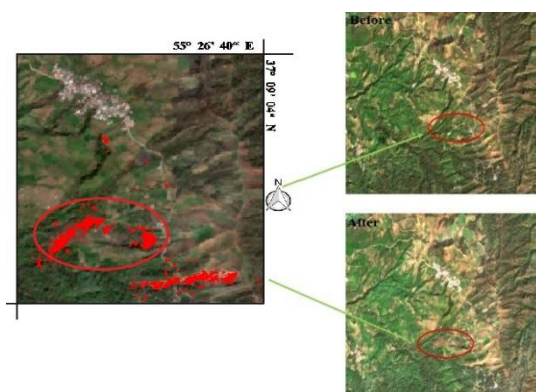
توجه به این شکل مشخص است که عمده زمین لغزش‌های به وقوع پیوسته در این منطقه، در قسمت جنوبی و بدون سکنه روستای تخت بوده و آسیب جدی و قابل ملاحظه‌ای به روستا وارد نشده و به همین دلیل این زمین لغزش‌ها هیچ‌گونه تلفات جانی و مالی در پی نداشته‌اند.

۶-۱- ارزیابی دقت

هر روزه در سراسر کشور، زمین لغزش‌های بزرگ و کوچکی به وقوع می‌پیوندند که پایش و بررسی تمامی آن‌ها امکانپذیر نمی‌باشد. زمین لغزش تخت نیز یکی از این زمین لغزش‌ها می‌باشد که هیچ اطلاعات زمینی و نقشه تغییراتی برای این منطقه در بازه زمانی مورد مطالعه در این تحقیق یافت نشده است، اما بررسی دقت نتایج تولید شده در هر مطالعه‌ای یکی از قسمت‌های اساسی و بسیار مهم تلقی می‌گردد. برای ارزیابی و اثبات صحت و دقت نتایج تولید شده در این مطالعه، از مقایسه بصری شکل ۳ با تصاویر اپتیک سنجنده Sentinel_2 اقدام خواهیم نمود.

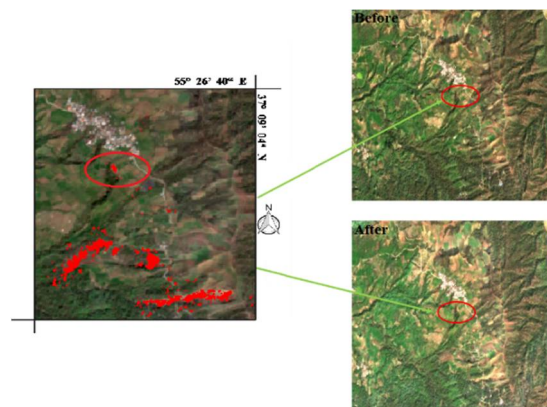


شکل ۴. مقایسه نقشه زمین لغزش تولید شده با تصاویر اپتیک Sentinel-2 قبل و بعد از زمین لغزش



شکل ۵. مقایسه نقشه زمین لغزش تولید شده با تصاویر اپتیک Sentinel-2 قبل و بعد از زمین لغزش

در ادامه به بررسی چند نمونه از این دست مقایسه‌ها خواهیم پرداخت. همانطور که در شکل‌های ۴، ۵ و ۶ نشان داده شده‌است، می‌توان با مقایسه نقشه زمین لغزش تولید شده در این تحقیق و مقایسه با تصاویر اپتیک Sentinel_2 قبل و بعد از زمین لغزش، به دقت نتایج تولید شده دست یافت.



شکل ۶. مقایسه نقشه زمین لغزش تولید شده با تصاویر اپتیک Sentinel-2 قبل و بعد از زمین لغزش

باتوجه به سه شکل قبلی مشخص است که مناطقی که در روش ارائه شده به عنوان زمین لغزش استخراج شده‌اند، کاملاً با واقعیت مطابقت داشته و این نشان از دقت مناسب نتایج استخراج شده دارد. نتایج بدست آمده علاوه بر اینکه از دقت بالایی برخوردار هستند، نیاز به سیستم پرقدرت برای پردازش‌ها و همچنین صرف زمان بالا ندارند. زمان مورد نیاز برای دستیابی به نقشه مورد نظر با استفاده از موتور پردازشی GEE، کمتر از یک دقیقه می‌باشد، بنابراین، تمامی این موارد نشان‌دهنده سرعت، قدرت و مزیت بالای این روش نسبت به سایر روش‌ها می‌باشد.

۷- نتیجه‌گیری

هر روزه در سرتاسر جهان زمین لغزش‌های متعددی به وقوع می‌پیوندد که می‌تواند سبب بروز خسارات جانی و مالی فراوانی گردند، از اینرو مطالعه بر روی این موضوع و شناسایی این مناطق امری ضروری محسوب می‌گردد. هدف اصلی این تحقیق شناسایی تغییرات حاصل از رخداد زمین لغزش با استفاده از تصاویر راداری می‌باشد. روش‌های مختلف ژئودتیک و غیر ژئودتیک برای شناسایی زمین لغزش وجود دارد که دارای مزایا و معایب خاص خود هستند که در بخش

پیشینه تحقیق به آن‌ها اشاره شد اما در این مطالعه اساس کار استفاده از تصاویر راداری سنجنده Sentinel-1A که رایگان و به سادگی در دسترس هستند می‌باشد. نکته قابل توجه و بزرگترین مزیت این تحقیق، ترکیب تصاویر بالاگذر و پایین گذر راداری و استفاده از محیط پردازشی Google Earth Engine می‌باشد، با استفاده از این محیط دیگر نیازی به دانلود تصاویر حجیم سنجنده Sentinel و داشتن سیستمی قوی برای پردازش تصاویر نخواهد بود.

در این تحقیق از ترکیب تصاویر قبل و بعد از زمین لغزش در هر دو حالت بالاگذر و پایین گذر استفاده شد و در نهایت تصویر $I_{ratioAverage}$ تولید شد. سپس با حذف مناطقی که سبب بروز خطا می‌شوند از جمله مناطق کشاورزی، مناطق تحت پوشش آب و ... تصویر ماسک شده $I_{ratioAverage}$ را تولید نمودیم و در نهایت با تعیین یک حد آستانه مناسب، نقشه مناطق تحت تاثیر زمین لغزش تولید گردید. از آنجا که هیچ داده زمینی در بازه زمانی منطبق بر داده‌های ما وجود نداشت، به منظور ارزیابی دقت از تصاویر اپتیک سنجنده Sentinel-2 استفاده شد. با مقایسه بصری نقشه تولید شده و تصاویر اپتیک که در شکل‌های ۴ و ۵ و ۶ نشان داده شده است، مطابقت بالایی نقشه ارائه شده با واقعیت اثبات گردید و این دقت و صحت نتایج تولید شده را اثبات می‌نماید. پس

مراجع

می‌توان گفت که روش ارائه شده در این تحقیق، روشی سریع، دقیق، کارآمد و مقرون به صرفه می‌باشد و می‌توان از این روش در هنگام بروز بحران استفاده کرده و در کمترین زمان ممکن مناطق آسیب‌دیده را شناسایی نموده و روند امداد و نجات را تسریع بخشید.

با توجه به اینکه در تصاویر سنجنده Sentinel-1A دو پلاریزاسیون VV و VH وجود دارد، در این تحقیق تنها از پلاریزاسیون VH استفاده شد چرا که با توجه به اینکه منطقه دارای پوشش گیاهی می‌باشد، به دلیل بروز Volume backscattering هنگام بازگشت موج ارسالی به طرف سنجنده، پلاریزاسیون موج ارسالی با پلاریزاسیون موج دریافتی متفاوت خواهد بود، بنابراین، بایستی پلاریزاسیون VH مورد بررسی قرار گیرد، اما پیشنهاد می‌گردد در مطالعات آتی پلاریزاسیون VV نیز مورد بررسی قرار گیرد. همچنین، پیشنهاد می‌گردد این روش بر روی منطقه‌ای که اطلاعات کنترل زمینی در آن موجود می‌باشد پیاده‌سازی شده و دقت کمی این روش نیز محاسبه گردد. همچنین پیشنهاد می‌گردد با افزایش بازه زمانی و تعداد تصاویر راداری مورد استفاده در روند پردازشی پیشنهاد شده، دقت نهایی با حالت استفاده از دو تصویر قبل و بعد مقایسه گردد.

- [۱] Mozafari, M., 2021. Monitoring the movement of land in landslide areas using time series radar interferometry analysis. Master thesis, K. N. Toosi University of Technology.
- [۲] Serey, A., Piñero-Feliciangeli, L., Sepúlveda, S.A. et al. "Landslides induced by the 2010 Chile megathrust earthquake: a comprehensive inventory and correlations with geological and seismic factors." Landslides vol. 16, pp. 1153–1165, 2019.
- [۳] AliAsl Khiabani, E., Valadan Zoej, M. j., Maghsoudi, Y., 2022. Monitoring the earth-fill dams displacement using the time series radar data. Journal of Geomatics Science and Technology, 11(4): 83-96
- [۴] Wang, F., Fan, X., Yunus, A.P. et al. "Coseismic landslides triggered by the 2018 Hokkaido, Japan (Mw 6.6), earthquake: spatial distribution, controlling factors, and possible failure mechanism." Landslides vol. 16, pp. 1551–1566, 2019.
- [۵] Mondini, A.C., Guzzetti, F., Chang, K.T., Monserrat, O., Martha, T.R. and Manconi, A., 2021. Landslide failures detection and mapping using Synthetic Aperture Radar: Past, present and future. Earth-Science Reviews, p.103574.
- [۶] Bardi, F., Frodella, W., Ciampalini, A., Bianchini, S., Del Ventisette, C., Gigli, G., Fanti, R., Moretti, S., Basile, G. and Casagli, N., 2014. Integration between ground based and satellite SAR data in landslide mapping: The San Fratello case study. Geomorphology, 223, pp.45-60.
- [۷] Herrera, G., Notti, D., García-Davalillo, J.C., Mora, O., Cooksley, G., Sánchez, M., Arnaud, A. and Crosetto, M., 2011. Analysis with C-and X-band satellite SAR data of the Portalet landslide area. Landslides, 8(2), pp.195-206.
- [۸] Zhang, B. and Wang, Y., 2020. An improved two-step multitemporal SAR interferometry method for precursory slope deformation detection over nanyu landslide. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 18(4), pp.592-596.
- [۹] Sun, Q., Zhang, L., Ding, X.L., Hu, J., Li, Z.W. and Zhu, J.J., 2015. Slope deformation prior to Zhouqu, China landslide from InSAR time series analysis. Remote Sensing of Environment, 156, pp.45-57.

- [۱۰] Uemoto, J., Moriyama, T., Nadai, A., Kojima, S. and Umehara, T., 2019. Landslide detection based on height and amplitude differences using pre-and post-event airborne X-band SAR data. *Natural Hazards*, 95(3), pp.485-503.
- [۱۱] Mondini, A.C., Santangelo, M., Rocchetti, M., Rossetto, E., Manconi, A. and Monserrat, O., 2019. Sentinel-1 SAR amplitude imagery for rapid landslide detection. *Remote sensing*, 11(7), p.760.
- [۱۲] Konishi, T. and Suga, Y., 2018. Landslide detection using COSMO-SkyMed images: A case study of a landslide event on Kii Peninsula, Japan. *European journal of remote sensing*, 51(1), pp.205-221.
- [۱۳] Park, S.E., Lee, S.G., 2019. On the use of Single-, Dual-, and Quad-Polarimetric SAR observation for landslide detection. *ISPRS Int. J. Geo Inf.* 8
- [۱۴] تخت (مینودشت) [https://fa.wikipedia.org/wiki/تخت \(مینودشت\)](https://fa.wikipedia.org/wiki/تخت_(مینودشت))
- [۱۵] Mahdavian, A., 2013. Seismic zoning of Golestan province. *Geosciences Scientific Quarterly Journal*, 23(89), pp.165-174.
- [۱۶] H. Laur¹, P. Bally², P. Meadows³, J. Sanchez⁴, B. Schaettler⁵, E. Lopinto⁶, D. Esteban⁴; 2004, "Derivation of the Backscattering Coefficient σ_0 in ESA ERS SAR PRI PRODUCTS"; ES-TN-RS-PM-HL09 Issue 2, Rev. 5f.
- [۱۷] https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/COPERNICUS_S1_GRD.
- [۱۸] Jung, J. and Yun, S.H., 2020. Evaluation of coherent and incoherent landslide detection methods based on synthetic aperture radar for rapid response: A case study for the 2018 Hokkaido landslides. *Remote Sensing*, 12(2), p.265.