

ارزیابی عملکرد بارش سنگین در فعال شدن مجدد پالئولنداسلاید روستای حسین آباد کالپوش

مهديه غيور بلورفروشان - دانشجوي دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه فردوسی مشهد.
سید رضا حسین زاده * - دانشیار ژئومورفولوژی، گروه جغرافیا، دانشگاه فردوسی مشهد.
غلامرضا لشکری پور - استاد زمین شناسی مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.
مسعود مینائی - دانشیار علوم اطلاعات جغرافیایی (GIScience)، گروه جغرافیا، دانشگاه فردوسی مشهد.
حکیمه مربی هروی - استادیار گروه آمار، دانشگاه بجنورد.

پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۶/۱۲ تأیید نهایی: ۱۴۰۱/۱۱/۲۱

چکیده

اکثر لغزش‌ها در بستر لغزش‌های قدیمی به وقوع می‌پیوندند و براین اساس برای پیش‌بینی خطرات احتمالی لغزش در آینده، شناسایی لغزش‌های قدیمی یا همان پالئولنداسلایدها بسیار مهم است. فعالیت مجدد پالئولنداسلایدها در سال‌های پربارش اخیر، خسارات فراوانی را به روستاهای حوضه کالپوش استان سمنان و گلستان وارد نموده است. لذا هدف از این پژوهش شناسایی پالئولنداسلاید روستای حسین آباد کالپوش و پایش فعالیت مجدد آنها در برابر بارش سنگین اواخر سال ۱۳۹۷، با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری مبتنی بر پراکنش‌کننده‌های دائمی PS است. داده‌های تحقیق شامل داده‌های تاریخی، بازدیدهای میدانی، آمار بارندگی روزانه و ۶۸ تصویر راداری سنتینل 1A/B می‌باشد. به این منظور ابتدا نقشه پراکنش پالئولنداسلایدها و لغزش‌های جدید براساس سال وقوع از روی عکس‌های هوایی، تصاویر ماهواره‌ای و بازدیدهای میدانی تهیه و نقشه ژئومورفولوژی لغزش حسین آباد ترسیم گردید و آمار بارندگی روزانه و تجمعی بارش مورد تحلیل قرار گرفت، سپس با استفاده از روش سری زمانی PS، نقشه نرخ جابه‌جایی پالئولنداسلاید حسین آباد بین سال‌های ۱۳۹۷-۱۳۹۸ تولید شد. نتایج پژوهش بیانگر این است که، عامل محرک بارش سنگین سبب ایجاد تنش و شکست در سطح لغزشی گردیده است. همچنین، تغییرات نرخ جابه‌جایی در مدار بالاگذر از ۱۲- میلی‌متر تا ۱۹ میلی‌متر در یکسال برای لغزش حسین آباد ثبت گردیده است. موقعیت مکانی این جابه‌جایی‌ها با ویژگی‌های فضایی- مکانی لغزش‌های جدید در طبیعت مطابقت دارد. این جابه‌جایی‌ها در زون‌های برداشت و انباشت لغزش باعث تخریب منازل زیادی در روستای حسین آباد کالپوش شده‌اند و باتوجه به اهمیت موضوع و مخاطرات آن برای ساکنین منطقه، مطالعات بیشتری در این زمینه لازم می‌باشد.

واژگان کلیدی: زمین لغزش، پالئولنداسلاید، کالپوش، سنتینل 1.

مقدمه

زمین لغزش‌ها به عنوان شایع‌ترین مخاطره طبیعی در مناطق کوهستانی، اغلب باعث ایجاد تلفات سنگین اقتصادی و انسانی می‌شود. اصطلاح زمین لغزش^۱ در حوزه‌های عمومی و تخصصی، مفاهیم و کاربردهای متنوعی دارد. طبق تعریف کازیو و پوستوئو^۲ (۲۰۱۷) زمین لغزش، فرآیند تغییر حالت تنشی-کرنشی بخشی از دامنه، که منجر به جدا شدن مواد سطحی و حرکت مواد در جهت شیب دامنه به سمت پایین می‌شوند، می‌باشد (لی و مو^۳، ۲۰۱۹: ۶۸). پالئولنداسلاید^۴ نیز توسط کلاگو^۵ (۲۰۱۲)، به عنوان حرکات توده‌ای که قبل از یک دوره تاریخی به وجود آمده‌اند و با استفاده از شواهد زمین‌شناسی و ژئومورفولوژی شناسایی می‌شوند، تعریف شده است. این لغزش‌ها با توجه به شکل فرم زمین در طبیعت و عکس‌های هوایی قدیمی مورد شناسایی قرار می‌گیرند و معمولاً پرتگاه لغزش با پوشش گیاهی در طی زمان پوشیده شده است. زمین لغزش‌ها براساس زمان وقوع به چهار گروه باستانی^۶ (قبل از هولوسن)، قدیمی^۷ (اوایل هولوسن)، اخیر^۸ (اواخر هولوسن) و امروزی^۹ تقسیم می‌شوند (وانگ^{۱۰} و همکاران: ۲۰۱۱: ۱۸۳۱) و به طور کلی زمین لغزش‌های متعلق به گروه‌های باستانی، قدیمی و اخیر به عنوان پالئولنداسلایدها شناخته می‌شوند.

لغزش‌ها غالباً به طور ناگهانی و کاتاستروفیک رخ می‌دهند. براساس گزارش بانک اطلاعات بین‌المللی بلایای طبیعی، بر اثر زمین لغزش ۲۳۱۲ نفر تلفات انسانی در سال ۲۰۱۷ میلادی در جهان ثبت شده است، که این تعداد برای بازه ۹ ساله بین سال‌های ۲۰۱۶-۲۰۰۷ تنها ۸۳۰ مورد گزارش شده است (EM-DAT, 2018). این افزایش ناگهانی تلفات انسانی متأثر از زمین لغزش‌ها، با افزایش بارش‌های شدید در جریان تغییرات اقلیمی و گرمایش جهانی در مقیاس بزرگ همبستگی دارد (سایتو^{۱۱} و همکاران، ۲۰۱۴: ۹۹۹).

با افزایش بارش‌های شدید در سال‌های اخیر، زمین لغزش‌های فراوانی در مناطق مختلف ایران به وقوع پیوسته است. در ارتفاعات استان‌های گلستان و سمنان نیز به علت توپوگرافی عمدتاً کوهستانی، فعالیت‌های تکتونیکی، شرایط لیتولوژیکی، لرزه‌خیزی زیاد، بارش‌های شدید، رودخانه‌های پرآب، جنگل‌زدایی، سدسازی، رشد جمعیت و استقرار در دامنه‌های پرخطر، در گذر زمان پدیده زمین لغزش بیشتر رخ داده است و این عوامل، پالئولنداسلایدها یا همان زمین لغزش‌های قدیمی را دوباره و یا برای چندمین بار فعال نموده‌اند. در حوضه کالپوش واقع در استان سمنان، پالئولنداسلایدهای بزرگ فراوانی در دامنه تپه‌ها وجود دارد که، طی بارش‌های شدید زمستان ۱۳۹۷ و بهار ۱۳۹۸ فعال گردیده و خسارات مالی زیادی را به روستای حسین آباد کالپوش وارد نموده‌اند و نزدیک به ۳۳۰ واحد مسکونی تحت تأثیر رانش قرار گرفته و جاده روستایی نیز جابه‌جا شده است.

تاکنون مطالعات اندکی درباره پایش پالئولنداسلایدها و نقش آنها در وقوع لغزش‌های جدید در جهان صورت گرفته است. در این رابطه، سارکار^{۱۲} (۱۹۹۹)، با تمرکز بر روی پالئولنداسلایدهای هیمالیای هند، فعالیت آنها را در سال‌های ۱۸۴۹ تا

¹. Landslide

². Kazeev and Postoev

³. Li and Mo

⁴. Paleolandslide

⁵. Clague

⁶. Ancient (Before Holocene)

⁷. Old (Early Holocene)

⁸. Recent (Late Holocene)

⁹. Present-day

¹⁰. Wang

¹¹. Saito

¹². Sarkar

۱۹۹۹ مورد ارزیابی قرار داد. وی روابط معناداری را بین لغزش‌های جدید و موقعیت مکانی لغزش‌های قدیمی پیدا نکرد و بیان نمود که هر لغزش دارای ویژگی‌های خاص خود است و شروع آن دلایل مختلفی دارد. یکی از بزرگترین زمین لغزش‌های تاریخی ثبت شده در جهان در کانتن^۱ سوئیس در سال ۱۸۰۶ می‌باشد. این زمین لغزش باعث مرگ ۴۳۷ نفر از اهالی یک روستا شد. تحقیقات روی این لغزش نشان از وقوع دو زمین لغزش تاریخی در گذر زمان در این منطقه دارد که، به دلیل حضور مارن و بارش‌های سنگین رخ داده‌اند. بعد از مطالعات صورت گرفته توسط ثورو^۲ و همکاران درباره لغزش کانتن (۲۰۰۶)، مشخص شد که بخشی عظیمی از علت وقوع این لغزش، مستقیماً ناشی از شکست-های قدیمی بوده است.

همچنین در پژوهش دیگری فان^۳ و همکاران (۲۰۱۸)، به مطالعه زمین لغزش فاجعه بار تانگجیوان^۴ که بر اثر زلزله سال ۲۰۰۸ ونچوان^۵ رخ داده بود، پرداختند. آنها با استفاده از DEM تهیه شده از تصاویر پهپاد و تصاویر ماهواره‌ای دیگر نظیر Spot و Google Earth پس از بررسی به این نتیجه رسیدند که، این توده لغزشی یک پالئولنداسلاید بوده و بر اثر زلزله سال ۲۰۰۸ و بارش سنگین سال ۲۰۱۶، دو بار در طی زمان فعال شده است و زمین لغزش‌های پی‌درپی تانگجیوان با تکتونیک فعال منطقه ارتباط مستقیمی دارد.

در یکی از جدیدترین مطالعات صورت گرفته در اروپا، تمم^۶ و همکاران (۲۰۲۰)، اصطلاح جدید زمین لغزش‌های وابسته به فاصله^۷ را در طبقه‌بندی لغزش‌ها گنجانده‌اند. در این طبقه‌بندی سه نوع زمین لغزش براساس فاصله مکانی پالئولنداسلایدها و لغزش‌های مدرن معرفی می‌شود.

یکی از پیشرفت‌های دهه گذشته در زمینه بررسی حرکات لغزش‌ها در طی زمان مربوط به حوزه سنجش از دور و مطالعات راداری می‌باشد. تکنیک تداخل سنجی راداری یک روش قدرتمند برای تخمین ارتفاع و شناسایی جابه‌جایی سطح زمین است (دای^۸ و همکاران، ۲۰۱۹). در این زمینه دل و نتبیزت^۹ و همکاران (۲۰۱۴)، اسپلوجل^{۱۰} و همکاران (۲۰۱۵)، لازکی^{۱۱} و همکاران (۲۰۱۵)، بایر^{۱۲} و همکاران (۲۰۱۸)، لی‌یو^{۱۳} و همکاران (۲۰۲۰)، سامسونو^{۱۴} و همکاران (۲۰۲۰) لی‌یو^{۱۵} و همکاران (۲۰۲۱)، شیرانی (۱۳۹۷) یاراحمدی و همکاران (۱۳۹۹) و ... با استفاده از تصاویر راداری ALOS/PALSAR، Sentinel 1، EnviSat، و ... به ارزیابی جابه‌جایی زمین لغزش‌ها پرداخته‌اند. در این زمینه اکر و آیدین^{۱۶} (۲۰۲۱)، با ترکیب موفقی از مجموعه‌ای از داده‌های سنجش از دور شامل داده‌های تاریخی مانند عکس‌های هوایی، تکنیک تداخل

1. Kanten

2. Thuro

3. Fan

4. Tangjivan

5. Wenchuan

6. Temme

7. Path-dependent landsliding

8. Dai

9. Del Ventisette

10. Schlogel

11. Lazecky

12. Bayer

13. Liu

14. Samsonov

15. Liu

16. Eker & Aydin

سنجی تفاضلی راداری (DinSAR) با استفاده از تصاویر راداری مختلف و در نهایت تصاویر پهپاد^۱ UAV توانستند، نظارت طولانی مدتی بین سال‌های ۲۰۱۵-۱۹۹۲ بر حرکات کند زمین لغزش دورک^۲ ترکیه داشته باشند. شناسایی زمین لغزش و فاکتورهای تاثیرگذار بر وقوع آن، مدتهاست که در مطالعات جهان و ایران مورد پژوهش قرار گرفته‌اند و اغلب گزارش شده‌اند. اما توجه به مکانیسم، مکان و مقیاس زمانی آنها در ایران و منطقه مورد مطالعه، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. با توجه به اینکه غالب فرسایش شیب دامنه‌ها در بسیاری از محیط‌های مرطوب کوهستانی بر اثر بارش‌های سنگین و زمین‌لرزه رخ می‌دهند (ایوانس^۳ و همکاران، ۲۰۱۱) و همچنین رانش زمین اغلب در مکان‌هایی اتفاق می‌افتد که در گذشته رخ داده است، لذا از جمله اهداف این پژوهش و وجه تمایز آن با مقالات مشابه، شناسایی پالئولنداسلایدها و پایش حرکت مجدد آنها در زمان حال، با تمرکز بر عامل محرک غالب در منطقه مانند بارش سنگین، توسط تکنیک تداخل سنجی راداری مبتنی بر پراکنش کننده‌های دائمی PS می‌باشد.

منطقه مورد مطالعه

روستای حسین آباد کالپوش از توابع شهر رضوان در بخش کالپوش شهرستان میامی، در شمال استان سمنان و در همسایگی استان گلستان واقع شده است. این روستا در شرق و جنوب شرق ارتفاعات جنگلی شهرهای گالیکش و مینودشت استان گلستان قرار دارد. روستای حسین آباد با مساحت ۶۰ هکتار و جمعیت ۳۵۱۴ نفر براساس سرشماری مرکز آمار ایران در سال ۱۳۹۵ بزرگترین روستا در منطقه می‌باشد (شکل ۱). روستا بر روی فصل مشترک انتهایی دامنه‌های جنگل با ارتفاع متوسط ۱۲۵۰ متر و شیب متوسط ۱۴ درصد قرار گرفته است.

منطقه مورد مطالعه در زون زمین شناسی کپه‌داغ و در محل تصادم آن با البرز شرقی قرار دارد. سنگ آهک‌های مارنی سازند چمن بید با روند شمال شرقی- جنوب غربی در منطقه رخنمون دارد و گسل تراستی این سازند را از سازند کارستی مزدوران جدا می‌سازد. همچنین لندفرم‌های کارستی شاخصی نیز همچون غارهای عمیق، چشمه، دولین، اوولا و پولیه، پیرامون منطقه مشاهده می‌شود.

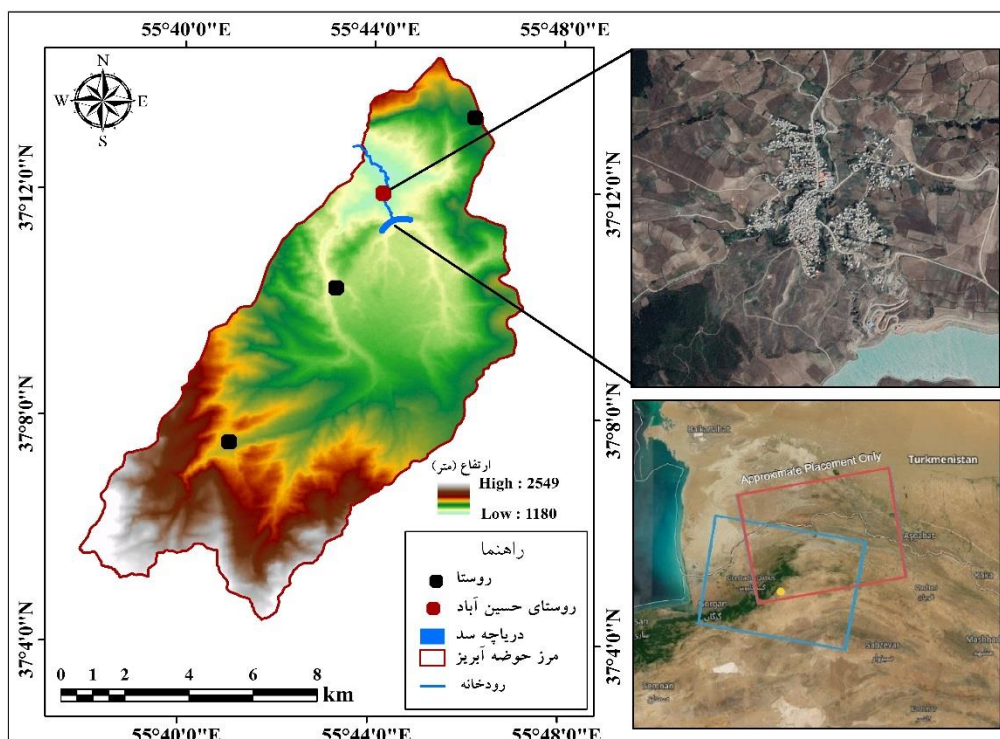
رودخانه اوغان که یکی از سرشاخه‌های اصلی گرگان‌رود می‌باشد از ارتفاعات شمالی نام نیک استان سمنان سرچشمه گرفته، و پس از گذر از روستای حسین آباد وارد استان گلستان می‌شود. مهمترین منبع آب زیرزمینی در منطقه چشمه‌های کارستی می‌باشند که در دشت و ارتفاعات کالپوش قرار دارند و سد خاکی کالپوش در بالادست روستای حسین آباد، جهت جمع آوری آب چشمه‌ها و تامین آب مورد نیاز منطقه در سال ۱۳۹۲ آبیگری شد.

آب و هوای منطقه متأثر از اقلیم خزری می‌باشد و متوسط میزان بارش سالانه در ایستگاه باران سنجی حسین آباد ۶۸۰ میلی‌متر و بیشترین مقدار آن ۱۰۰۹ میلی‌متر است. فروردین و اسفندماه بیشترین روزهای بارندگی را دارا بوده و مقدار رطوبت هوا ۷۰ درصد است. به دلیل وجود چشمه‌سارهای متعدد و آب و هوای مرطوب، پوشش گیاهی منطقه به صورت جنگل هیرکانی و مراتع خوب می‌باشد.

1. Unmanned Aerial Vehicle

2. Devrek

3. Evans



شکل ۱: نقشه منطقه مورد مطالعه و موقعیت تصاویر سنتینل اخذ شده در دو حالت مداری

مواد و روش تحقیق

داده‌های اولیه این مطالعه شامل، آمار بارش روزانه و ماهانه ایستگاه باران سنجی حسین‌آباد، لایه رقومی نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ دوزین چاپ سازمان زمین‌شناسی کشور، عکس‌های هوایی ۱:۲۰۰۰۰ تیرماه سال ۱۳۴۷، تصاویر ماهواره‌ای گوگل ارث، ۶۸ تصویر راداری سنتینل 1A/B، مشاهدات و اندازه‌گیری‌های حاصل از بازدیدهای میدانی و ثبت موقعیت لغزش‌ها با GPS می‌باشد. همچنین نقشه‌های مورد نیاز در محیط نرم‌افزار Arc GIS تولید و استخراج شده‌اند و ۶۶ اینترفروگرام تولید شده، در محیط نرم‌افزار GMTSAR پردازش گردیده و در نرم‌افزار StaMPS نقاط پراکنش کننده‌های دائمی استخراج شدند. این پژوهش در سه مرحله شناسایی و تهیه نقشه ژئومورفولوژی پالتونداسلاید حسین‌آباد، بررسی عامل ماشه‌ای شدت بارش و تهیه نقشه جابه‌جایی لغزش با تکنیک تداخل سنجی راداری مبتنی بر پراکنش کننده‌های دائمی PS صورت گرفته است.

تهیه نقشه ژئومورفولوژی زمین لغزش

برای شناسایی مرز پالتونداسلایدهای منطقه، از داده‌های تاریخی موجود مانند عکس‌های هوایی قدیمی استفاده شد و پهنه‌های لغزشی قدیمی با دید سه بعدی شناسایی و ترسیم شدند. همچنین این لغزش‌ها با تصاویر ماهواره‌ای در دو بازه زمانی سال‌های ۱۳۸۹ و ۱۳۹۸ مورد ارزیابی قرار گرفتند و با بازدیدهای میدانی وجود لغزش و حدود آنها صحت سنجی شد و نقشه نهایی ژئومورفولوژی زمین لغزش حسین‌آباد ترسیم گردید.

بررسی عامل محرک شدت بارش

براساس گزارشات سازمان هواشناسی کشور، در زمستان سال ۱۳۹۷ و بهار ۱۳۹۸ بارش‌های زیادی در ایران و منطقه کالپوش به وقوع پیوست. این امر باعث فعال شدن مجدد پالئوندااسلاید حسین آباد شد، لذا برای ارزیابی آستانه حرکت مجدد این پالئوندااسلاید شدت بارش و مقدار تجمع بارندگی مورد محاسبه قرار می‌گیرد. سازمان جهانی هواشناسی (WMO^۱) براساس معادله تریاتمودجو^۲ (۲۰۰۸)، شدت بارندگی را مطابق جدول شماره ۱ طبقه‌بندی می‌نماید. همچنین در این پژوهش براساس آمار بارندگی روزانه در ماه‌های پربارش، مقدار تجمعی بارندگی در نرم افزار اکسل محاسبه و با توجه به زمان وقوع لغزش مورد تحلیل قرار می‌گیرد.

جدول ۱: طبقه بندی شدت بارش براساس استاندارد بین المللی WMO

ردیف	طبقه بندی بارش	شدت بارش (میلی متر)
۱	بسیار سبک	<۵
۲	سبک	۵-۲۰
۳	معمولی	۲۰-۵۰
۴	شدید	۵۰-۱۰۰
۵	سنگین	۱۰۰>

تهیه نقشه فعالیت مجدد الئوندااسلایدها با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری

تکنیک مبتنی بر پراکنشگرهای دائمی را نخستین بار فرتی^۳ و همکاران ۲۰۰۱ مطرح کردند. در این روش پیکسل‌هایی از تصویر که در بازه زمانی مورد نظر هم‌دوس باقی بمانند به عنوان نقاط PS معرفی می‌گردند. نرخ جابه‌جایی این نقاط با یک مدل جابه‌جایی که از قبل معلوم می‌باشد تطابق دارد. در ادامه هوپر^۴ ۲۰۰۷، با استفاده از روش StaMPS انتخاب پراکنش‌کننده‌های دائمی را بدون نیاز به دانش اولیه مدل جابه‌جایی آنها ارائه داد. در این مقاله نیز از روش StaMPS استفاده شد و برای محاسبه نرخ و سرعت جابه‌جایی و فعالیت مجدد پالئوندااسلاید، ۶۸ تصویر سنتینل 1A/B، قبل و بعد از وقوع بارش‌های سال ۱۳۹۷، در دو حالت مداری گذر بالا و گذر پایین، با فرمت تصویر SLC، فرمت تصویربرداری IW و پلاریزاسیون VV تهیه شد (شکل ۱)، و اطلاعات تصاویر در جدول شماره ۲ آورده شده است. تصویر اصلی برای تهیه اینترفروگرام‌ها براساس کمترین مقدار خطای مبنای زمانی، مکانی و داپلر^۵ انتخاب گردید (مشهدی حسینعلی و شامی ۱۳۹۸: ۴۹، شامی و قربانی، ۱۳۹۸: ۳۸) و پس از پردازش‌های اولیه، ۶۷ اینترفروگرام براساس گراف شکل ۲ برای هر دو حالت مداری تهیه شد و مراحل پردازش مطابق شکل ۳ انجام شد. پس از انجام پردازش‌ها، نقشه‌های جابه‌جایی حوضه مورد مطالعه استخراج شدند و سپس نقشه پالئوندااسلاید با نقشه جابه‌جایی مورد تطبیق قرار گرفت.

1. World Meteorological Organization

2. Triatmodjo

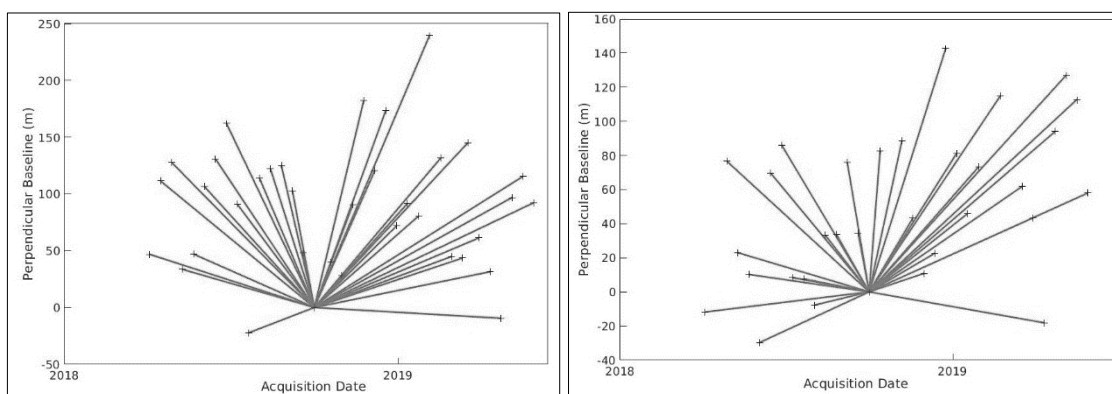
3. Ferretti

4. Hooper

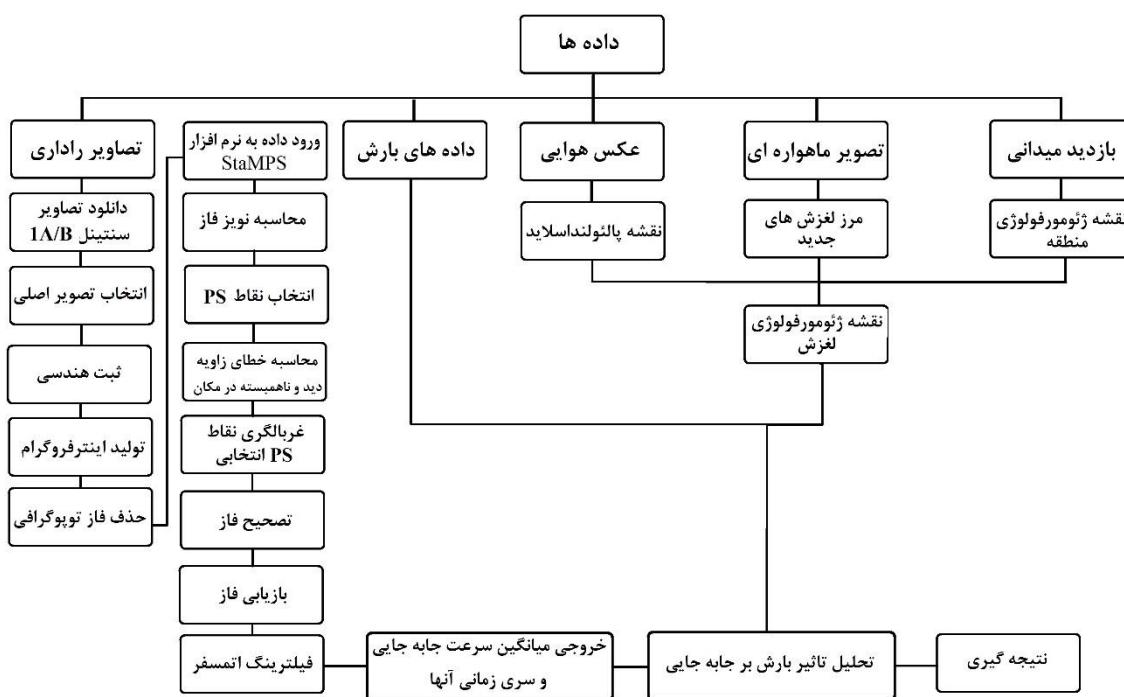
5. Doppler

جدول ۲: اطلاعات تصاویر سنتینل 1A/B اخذ شده از سایت آلاسکا

ماهواره	حالت مداری	تعداد تصویر	اولین تصویر	آخرین تصویر	تصویر پایه	عبور	مسیر
1A/B	بالاگذر	۳۶	۲۰۱۸/۰۴/۰۴	۲۰۱۹/۰۵/۲۹	۲۰۱۸۱۰۰۱	۱۱۹	۱۵۹
1A	پایین‌گذر	۳۲	۲۰۱۸/۰۴/۰۴	۲۰۱۹/۰۵/۲۹	۲۰۱۸۱۰۰۱	۴۶۸	۶۴



شکل ۲: شبکه گراف ترسیم شده برای اینترفروگرام‌های مسیره‌های ۱۵۹ و ۶۴. ضریب سیاه رنگ نشان دهنده تصاویر و خطوط ارتباطی نشان دهنده اینترفروگرام‌ها تولید شده بین جفت تصاویر می‌باشد. محور عمودی خط مبنای عمودی تصاویر نسبت به تصویر اصلی و محور افقی زمان ثبت تصاویر می‌باشد.



شکل ۳: مراحل انجام پژوهش

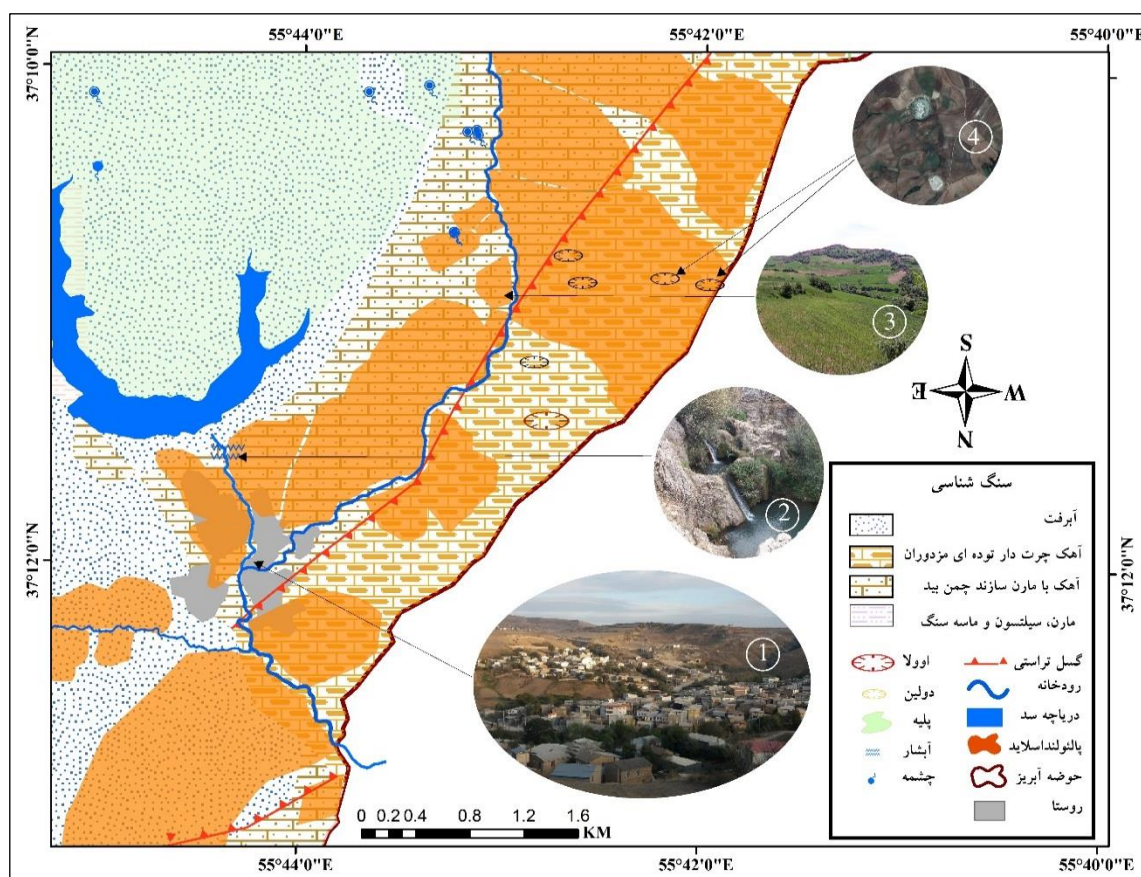
بحث و یافته‌ها

پیشینه فعالیت پالئونداسلایدهای روستای حسین آباد

پس از بررسی عکس‌های هوایی تیرماه ۱۳۴۷، مشخص شد که روستای حسین آباد بر روی ۴ زمین لغزش قدیمی یا همان پالئونداسلایدها بر روی سنگ بستر آهک مارن دار توسعه یافته است. با استناد به بازدیدهای میدانی بیشترین فعالیت‌های دامنه‌ای در زمان حال، بر روی این پهنه‌ها به وقوع پیوسته است (شکل ۴). با توجه به اقلیم پربارش و نقشه ژئومورفولوژی منطقه در شکل ۵، احتمالاً مکانیسم وقوع پالئونداسلایدهای روستا در گذشته و قبل از سال ۱۳۴۷، به عامل ماشه‌ای بارش سنگین و فرسایش در محیط کارستی برمی‌گردد و باتوجه به شرایط تکتونیکی و وقوع چندین زلزله پس از سال ۱۳۵۰، این لغزش‌ها برای چندمین بار فعال شده و حرکت نموده‌اند. در سال ۱۳۸۷ سد خاکی کالپوش با هسته رسی در فاصله ۱۰۰ متری از دو پالئونداسلاید بزرگ روستا، وارد فاز مطالعاتی و اولیه شد و در سال ۱۳۹۲ مورد بهره برداری قرار گرفت. بر روی این لغزش‌ها منازل مسکونی ساخته شده است و براساس صحبت‌های شفاهی مردم منطقه در اواخر خرداد ماه ۱۳۹۷ در زیرزمین چند منزل چشمه‌های موقتی آب ظهور پیدا کرده و اولین تغییرات در دامنه به صورت خزش و کج شدگی تیرهای برق مشاهده شده است. در اواخر اسفند ۱۳۹۷ با بارش برف و باران سنگین، پالئونداسلاید بزرگ پشت سد شروع به فعالیت و حرکت دوباره می‌نماید و باعث شکستگی و قطعی تیر چراغ برق و دکل مخابراتی می‌شود و در اوایل فروردین ماه ۱۳۹۸ حرکت دامنه سبب ترک و ریزش سقف خانه‌ها و خرابی بالغ بر ۳۰۰ خانه می‌شود و زمین‌های دامنه لغزشی شکافته و غیرقابل استفاده می‌گردد.



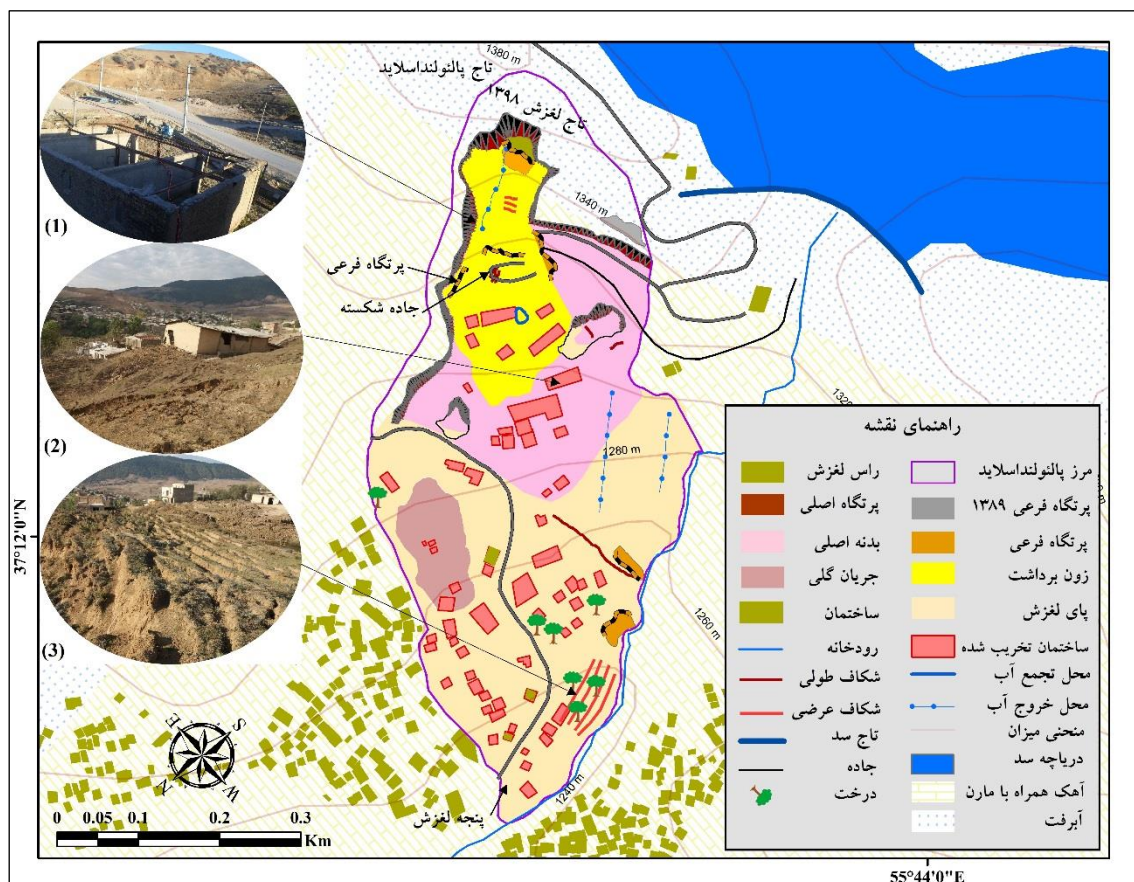
شکل ۴: لغزش‌های روستای حسین‌آباد، رنگ بنفش پالئونداسلاید ۱۳۴۷، قرمز لغزش جدید و سبز لغزش جدید متأثر از بارش



شکل ۵: نقشه ژئومورفولوژی حوضه کالپوش، (۱) نمای کلی روستای حسین آباد، (۲) آبشار حسین آباد، (۳) تصویر یک پالئوداسلاید در منطقه و (۴) تصویر گوگل ارث دو دولین پر از آب

ویژگی های زمین لغزش حسین آباد

پالئوداسلاید فعال شده حسین آباد با مساحت $2/13$ کیلومتر مربع در بالا دست تاج سد واقع شده است و بر روی دامنه‌ای با جهت شمال غربی با طول ۸۷۰ متر و عرض ۴۱۹ متر قرار دارد. زمین لغزش فعال شده از نوع چرخشی می باشد. ارتفاع تاج پالئوداسلاید ۱۳۷۸ متر بوده و ارتفاع تاج لغزش جدید ۱۳۶۰ متر می باشد. شیب در پرتگاه اصلی لغزش ۳۰ درصد بوده و تا پنجه لغزش در نزدیکی رود به ۳ درصد می رسد. در نقشه ژئومورفولوژی لغزش حسین آباد در شکل ۶، زون‌های زمین لغزش مشخص شده است. لغزش بر روی سنگ بستر آهک مارن دار به وقوع پیوسته است و چندین گسل کوچک در حدفاصل دریاچه سد و پشت دیواره تاج لغزش، رخنمون دارد. کاربری این دامنه مسکونی بوده و بیشترین ریزش کامل ساختمان‌ها مربوط به بدنه اصلی لغزش و زون برداشت می باشد. همچنین در پای لغزش بیشترین ترک دیوار، بالآمدگی کف و ریزش سقف ساختمان‌ها در طبقه همکف مشاهده می شود.



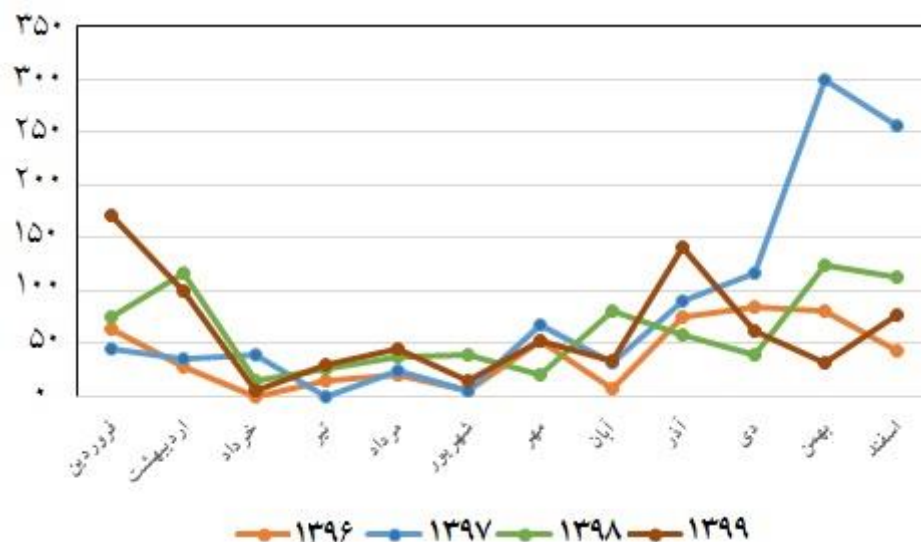
شکل ۶: نقشه ژئومورفولوژی زمین لغزش حسین آباد، (۱) تصویر پرتگاه لغزش قدیمی و جدید، (۲) تصویر بدنه اصلی و تخریب ساختمان ورزشگاه (۳) نمای شکاف های عرضی متعدد در پای لغزش و نزدیک رود

نقش شدت و مقدار بارش بر فعال شدن مجدد پالتولنداسلاید حسین آباد

زمین لغزش‌ها سیستم‌های هیدرولوژیکی پیچیده‌ای دارند و به ندرت یک رابطه ساده بین بارندگی و جابجایی وجود دارد (برتی و سیمونی^۱، ۲۰۱۲: ۲۱۸۷). با این حال، بارندگی، نفوذ و تغییرات ناشی از فشار منافذ را می‌توان محرک اصلی حرکت رانش زمین دانست (هندورگر^۲ و همکاران، ۲۰۱۳: ۲۳۹). در این رابطه، بارش‌های ماهانه ۵ سال اخیر روستای حسین آباد بر روی نمودار شکل ۷ مورد بررسی قرار گرفت. این منطقه در فصل زمستان سال ۱۳۹۷، در مجموع ۶۷۲ میلی‌متر بارندگی داشته و این مقدار بارش ۳/۵ برابر بیشتر از میانگین فصلی سال‌های قبل می‌باشد. مجموع بارش روزانه در ۳ روز آخر سال ۱۳۹۷، ۲۴۰ میلی‌متر گزارش شده است و در نتیجه با توجه به جدول شماره ۱، شدت بارندگی در ۲۸ اسفند ماه، با ۱۳۴ میلی‌متر بارش، در گروه بارش سنگین قرار می‌گیرد.

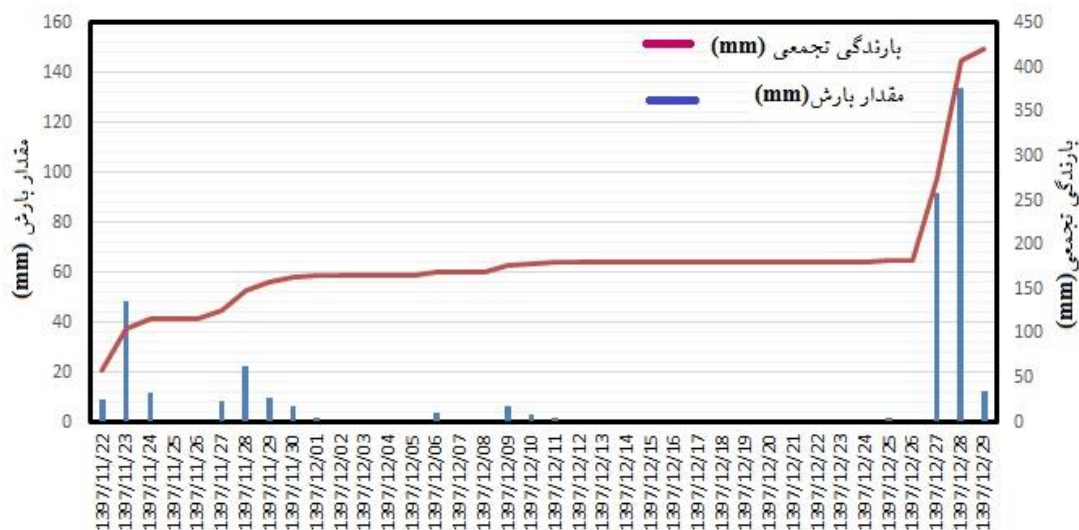
^۱ Berti and Simoni

^۲ Handwerger



شکل ۷: نمودار توزیع بارش ماهانه سال‌های ۱۳۹۶-۱۳۹۹ حوزه کالیوش

همچنین با توجه به نمودار شکل ۸، ۴۲۰ میلی‌متر بارش تجمعی از اواخر بهمن ماه تا اواخر اسفند ماه در این منطقه رخ داده است و این حجم از بارش ابتدا باعث بالا آمدن سطح آب دریاچه سد کالیوش شده، سپس آب دریاچه و بارش، به توده لغزشی نفوذ کرده و باعث کاهش مقاومت برشی خاک رسی و مارنی منطقه و آغاز لغزش شده است و با حضور ترک‌هایی بر روی دامنه پالتونداسلاید روستای حسین آباد، در تاریخ ۲۱ و ۲۶ اسفندماه اولین شواهد حرکت لغزشی ثبت گردیده است. ادامه بارش‌ها در طی زمان یک ماهه، منجر به نفوذ بیشتر آب به بدنه اصلی لغزش شده و با همراه شدن بارش سنگین آخر اسفندماه، سطح گسیختگی خمیری گردیده و سبب حرکت مجدد توده پالتونداسلاید در جهت دامنه، به صورت چرخشی شده است.



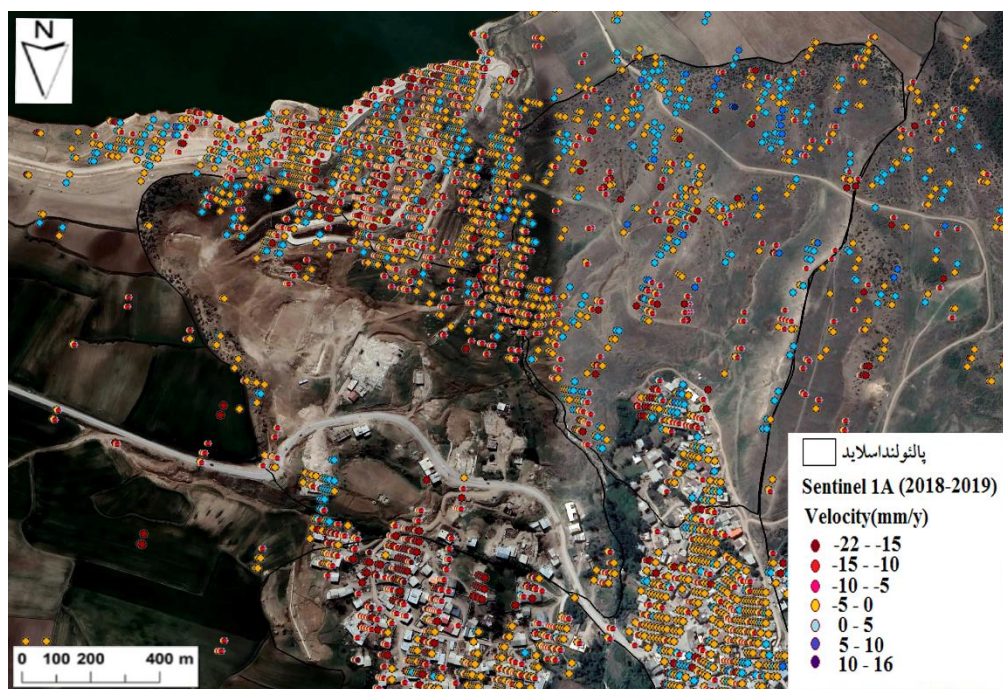
شکل ۸: نمودار بارش روزانه و تجمعی اواخر بهمن و اسفند ماه ۱۳۹۷ ایستگاه حسین آباد

پایش فعالیت مجدد پالئونداسلایدهای روستای حسین آباد

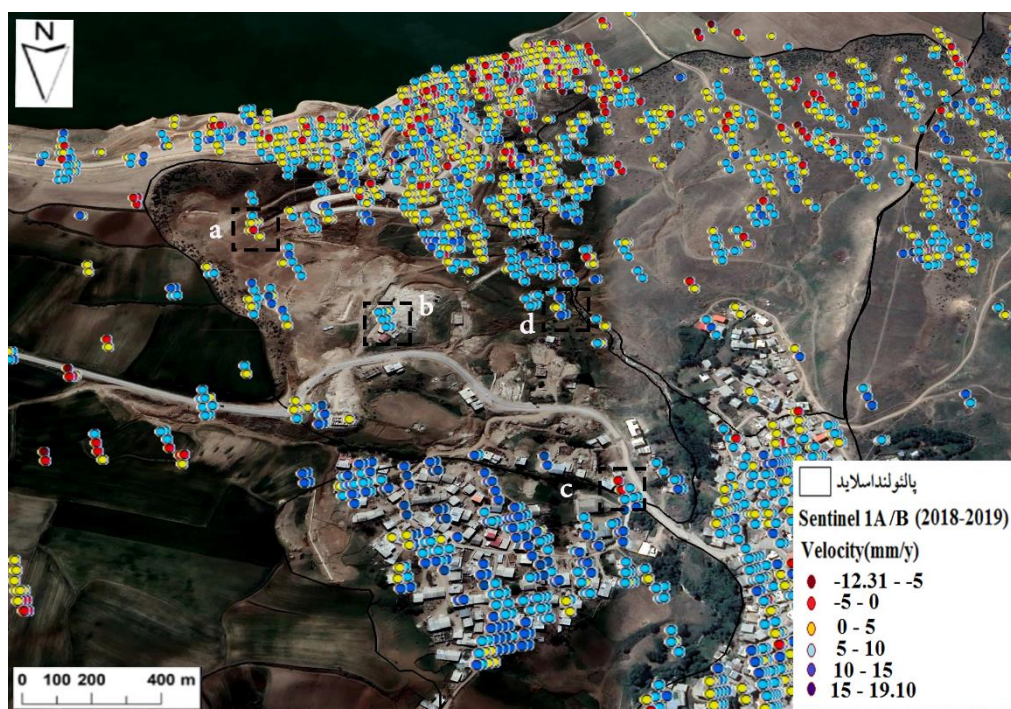
پس از پردازش تصاویر راداری با استفاده از الگوریتم سری زمانی تداخل سنجی PS، کل روستای حسین آباد مورد بررسی قرار گرفت و دو پالئونداسلاید مجاور سد بیشترین نرخ جابه‌جایی را ثبت نموده‌اند. موقعیت فضایی لغزش‌های شناسایی شده در بستر پالئونداسلایدها، از طریق تکنیک تداخل سنجی راداری در دوره پربارش، با لغزش‌های جدید ثبت شده در بازدیدهای میدانی تطابق کامل دارند. همچنین در پهنه پالئونداسلاید شمال غربی، نقاط PS کمتری نسبت به لغزش‌های مجاور شناسایی گردید که این امر خود بر حرکت زیاد دامنه و نبود نقاط ثابت تاکید می‌کند. با توجه به اینکه لغزش حسین آباد از نوع چرخشی می‌باشد، در نتیجه میزان جابه‌جایی اعم از بالآمدگی و پایین افتادگی در این لغزش‌ها در قسمت‌های مختلف لغزش متفاوت بوده و مناطق پرتگاه اصلی و فرعی و بدنه اصلی به صورت پایین افتادگی و منطقه انباشت یا پای لغزش به طور تدریجی به صورت بالا آمدگی می‌باشد.

باتوجه نقشه جابه‌جایی افقی در شکل ۹، میانگین سرعت جابه‌جایی شرقی-غربی بین سالهای ۲۰۱۸-۲۰۱۹ با استفاده از روش InSAR بین ۱۶ تا ۲۲- میلیمتر در یک سال برای این لغزش ثبت شده است. بیشترین جابه‌جایی‌های افقی در بدنه اصلی لغزش رخ داده است و سبب تخریب کامل ساختمان‌ها شده است.

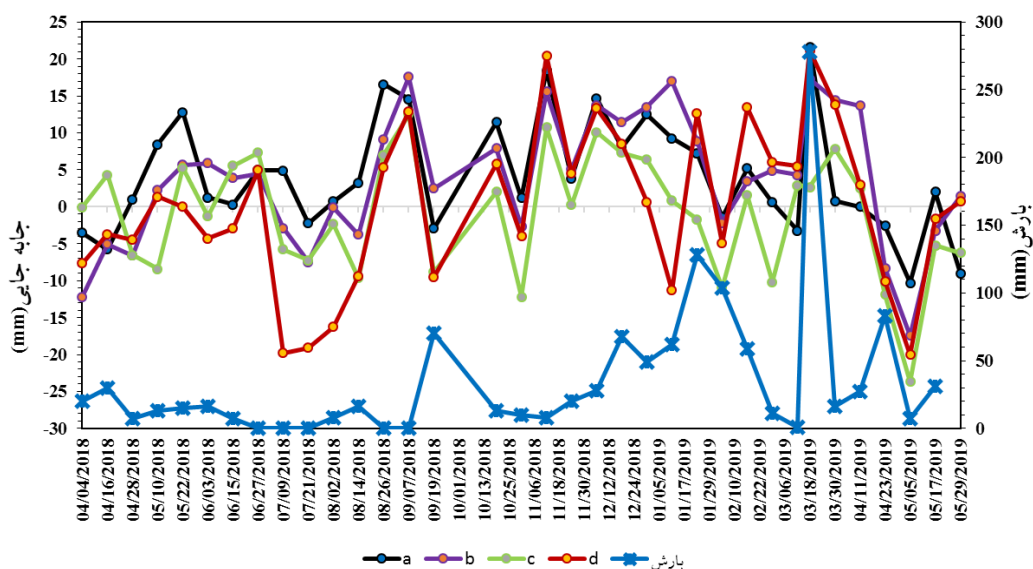
در نقشه جابه‌جایی قائم منطقه در شکل ۱۰، سرعت جابه‌جایی قائم بین ۱۹ میلیمتر تا ۱۲- میلیمتر در سال می‌باشد. ماکزیمم نرخ افتادگی ۳۵- میلیمتر در بدنه اصلی و پرتگاه و ماکزیمم نرخ بالآمدگی نیز با ۳۸ میلیمتر در پای لغزش می‌باشد. بیشترین افتادگی در منطقه زون برداشت و پنجه لغزش می‌باشد. همچنین بیشترین بالآمدگی و تجمع خاک نیز در پای لغزش می‌باشد که سبب بالآمدگی کف ساختمان‌ها و تخریب نسبی آنها شده است.



شکل ۹: نقشه جابه‌جایی زمین لغزش‌های قدیمی با استفاده از سری زمانی تداخل سنجی PS، در حالت مدار پایین گذر



شکل ۱۰: نقشه جابه‌جایی زمین لغزش‌های قدیمی با استفاده از سری زمانی تداخل سنجی PS، در حالت مدار بالا گذر



شکل ۱۱: نمودار تغییرات جابه‌جایی سری زمانی لغزش همراه با تغییرات بارش بین سال‌های ۲۰۱۸-۲۰۱۹

ارزیابی میزان جابه‌جایی پالئونداسلاید منطقه پس از بارش سنگین

در شکل ۱۰، ۴ نقطه به عنوان نقاط معرف جابه‌جایی در زون‌های مختلف لغزشی انتخاب شدند و نمودار تغییرات و جابه‌جایی آنها با توجه به نوسان بارندگی در شکل ۱۱ ترسیم گردید. نقاط a، b، c و d در مناطق پرتگاه، بدنه اصلی و پای لغزش، دارای نرخ نوسان جابه‌جایی مشابه هستند و از ۲۷ اسفندماه ۱۳۹۷ دچار شکست و فروافتادگی شده‌اند. با توجه به آمار بارش در این تاریخ، بارندگی با ۹۱ میلی‌متر آغازگر تنش در پهنه پالئونداسلاید بوده و آن را فعال نموده و با ادامه بارش سنگین با مقدار تجمعی ۲۴۰ میلی‌متر، در سه روز آخر سال لغزش بزرگ اتفاق افتاده است و تا ۱۵ اردیبهشت ماه ۱۳۹۸ این جابه‌جایی

ادامه داشته است. اما پیشینه روند جابه‌جایی نقطه d در سمت راست زون پای لغزش در منطقه بهرامی‌ها متفاوت می‌باشد. در نمودار این منطقه افتادگی محسوسی در اوایل تیرماه ۱۳۹۷ ثبت گردیده است و نمودار بارش در خرداد و تیر ماه ۱۳۹۷ با نرخ جابه‌جایی در این منطقه همخوانی ندارد، اما این رخداد با تاریخ ظهور چشمه‌های موقتی در زیرزمین منازل و کج شدگی تیرچراغ برق در این منطقه مطابقت دارد. بنابراین بارش عامل اصلی جابه‌جایی در این تاریخ نمی‌باشد و می‌توان علت فعالیت پالئولنداسلاید در این زون را به عواملی همچون نفوذ آب دریاچه سد از طریق گسل‌های پشت دیواره سد، به آهک‌های کارستی سنگ بستر و نگهداشت آن توسط مارن‌ها و تخلیه آن توسط چشمه‌ها و افزایش ساخت و سازها نسبت داد (شکل ۱۲). به عبارتی مکانیسم احتمالی فعالیت مجدد پالئولنداسلاید این منطقه در تابستان ۱۳۹۷ متأثر از نفوذ آب دریاچه سد و عوامل انسانی می‌باشد که نیاز به بررسی‌های تکمیلی در آینده دارد. این منطقه نیز در اواخر سال ۱۳۹۷ تحت تاثیر بارش‌های سنگین افت مجدد را تجربه نموده است و بیشترین شکاف‌های عرضی در پایین دست این پهنه به وقوع پیوسته است.

مقایسه نتایج به دست آمده از این پژوهش با مطالعات مشابه در دیگر نقاط جهان، مؤید کارآمدی روش‌های سری زمانی تداخل سنجی راداری تصاویر سنتینل در پایش لغزش‌ها دارد، به طوری که بایر و همکاران (۲۰۱۸)، با مطالعه ۲۵ زمین لغزش دامنه‌های آپنین^۱ ایتالیا در فصول پربارش، به این نتیجه رسیدند که لغزش‌ها، ۲۰ تا ۶۰ روز پس از بارندگی حرکت خواهند داشت. همچنین نتایج مطالعات دل‌وتنیزت و همکاران (۲۰۱۴) مشابه این پژوهش بوده و نشان می‌دهد که زمین لغزش‌های قدیمی در گذر زمان فعال شده و مخاطرات زیادی را ایجاد می‌کنند.



شکل ۱۲: الف: تصویر گسل‌های عادی سنگ بستر آهکی در پشت تاج لغزش و در مجاورت سد، ب: ظهور چشمه در زیرزمین منازل مسکونی، ج: ترک و شکاف‌های عرضی در خاک رس منطقه و د: کف بالآمده ساختمان ورزشگاه، که سبب ریزش دیوار و سقف شده است.

^۱ Apennines

نتیجه‌گیری

با توجه به تأثیرات منفی زمین لغزش‌ها بر زندگی اجتماعی و اقتصادی بشر، جمع‌آوری اطلاعات در مورد پویایی زمین لغزش‌ها، ارزیابی مکانیسم حرکت و کاهش خطرات آنها بسیار حائز اهمیت است. لغزش اغلب در جایی اتفاق می‌افتد که در گذشته رخ داده باشد، لذا برای پیش‌بینی خطرات احتمالی لغزش در آینده، شناسایی پالئولنداسلایدها و بررسی رفتار آنها بسیار مهم می‌باشد. در این تحقیق با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری مبتنی بر پراکنش‌کننده‌های دائمی PS میزان جابه‌جایی این لغزش‌ها در برابر بارش سنگین مورد تحلیل قرار گرفت. مجموع نتایج حاصل از این پژوهش بیانگر این است که، عامل ماشه‌ای بارش با ۴۲۰ میلیمتر بارش تجمعی در ۳۰ روز بارندگی، شرایط را برای فعال شدن پالئولنداسلایدها فراهم نموده و با اولین بارش سنگین معادل ۱۳۴ میلیمتر، سطح لغزشی شکسته شده است. بارش سنگین علاوه بر نفوذ بر توده سطحی دامنه لغزشی، باعث افزایش سطح آب دریاچه سد حسین آباد و نفوذ آب به توده لغزشی قدیمی شده و آن را دوباره فعال نموده است. به طوریکه نرخ جابه‌جایی بین ۱۹-۱۲ میلیمتر در دوره پربارش ثبت شده است و ادامه این روند می‌تواند سبب تخریب بیشتر منازل شود. علاوه بر این محدوده جابه‌جایی‌ها در نقشه تهیه شده، با ویژگی‌های فضایی- مکانی لغزش‌های جدید در طبیعت مطابقت کامل دارد. بیشترین افتادگی در منطقه زون برداشت و پنجه لغزش می‌باشد. همچنین بیشترین بالآمدگی و تجمع خاک نیز در پای لغزش می‌باشد که سبب بالآمدگی کف ساختمان‌ها و تخریب نسبی آنها شده است. در پژوهش‌های آینده می‌توان به بررسی نقش دریاچه سد کالپوش و عوامل انسانی دیگر در فعال شدن مجدد این پالئولنداسلاید پرداخت.

منابع

- شامی، س. و قربانی، ز.، ۱۳۹۸. پردازش تصاویر راداری با نرم افزارهای GMTSAR و SNAP، موسسه ارشدان، تهران.
- شیرانی، ک.، ۱۳۹۷. شناسایی، پایش و بررسی سازوکار زمین لغزش با استفاده از روش تداخل سنجی پراکنش‌کننده‌های دائمی تصاویر ماهواره‌ای رادار با روزه ترکیبی، علوم آب و خاک، شماره ۳، صص ۲۱۳-۲۳۴.
- مشهدی حسینی، م. و شامی، س.، ۱۳۹۸. پردازش تصاویر راداری با نرم افزار StaMPS، انتشارات دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران.
- یاراحمدی، ج.، حبیب زاده، ا.، رفیعی، م. و عباس زاده، ک.، ۱۳۹۹. رفتارسنجی توده لغزشی دوپیک در حوزه آبخیز اهرچای با استفاده از روش پراکنشگرهای ثابت تداخل سنجی راداری و GPS سه فرکانسه، فصلنامه علمی فضای جغرافیایی، سال بیستم، شماره ۶۹، صص ۱۵۲-۱۶۴.
- Bayer, B., Simoni, A., Mulas, M., Corsini, A. & Schmidt, D., 2018. Deformation responses of slow moving landslides to seasonal rainfall in the Northern Apennines, Measured by InSAR. *Geomorphology*, 308, 293-306.
- Berti, M. & Simoni, A., 2012. Observation and analysis of near-surface pore-pressure measurements in clay-shales slopes. *Hydrol. Process*, 26, 2187-2205.
- Clague, J., 2012. *Landslides: types, mechanisms and modeling*. Cambridge university press, Cambridge.
- Dai, K., Xu, Q., Li, Z., Tomas, R., Fan, X., Dong, X., Li, W., Zhou, Z., Gou, J. & Ran, P., 2019. Post-disaster assessment of 2017 catastrophic Xinmo landslide (China) by spaceborne SAR interferometry. *Landslide*, 16, 1189-1199.
- Del Ventisette, C., Righini, G., Moretti, S. & Casagli, N., 2014. Multitemporal landslide inventory map updating using spaceborne SAR analysis. *International journal of applied earth observation and geoinformation*, 30, 238-246.

- Eker, R. & Aydın, A., 2021. Long-term retrospective investigation of a large, deep-seated, and slow moving landslide using InSAR time series, historical aerial photographs, and UAV data: The case of Devrek landslide (NW Turkey). *Catena*, 196, 1-12.
- Evans, S., Delaney, K., Hermanns, R., Strom, A. & Scarascia-Mugnozza, G., 2011. The formation and behaviour of natural and artificial rockslide dams; implications for engineering performance and hazard management. *Natural and Artificial Rockslide Dams*, 133, 1–75.
- Fan, X., Zhan, W., Donga, D., van Westenc, C., Xu, Q., Dai, L., Yang, Q., Huang, R. & Havenith, H., 2018. Analyzing successive landslide dam formation by different triggering mechanisms: The case of the Tangjiawan landslide, Sichuan, China. *Engineering Geology*, 243, 128-144.
- Ferretti, A., C. Prati and F. Rocca., 2001. Permanent Scatterers in SAR interferometry. *IEEE Trans. Geosciences and Remote Sensing*, 39, 8–20.
- Handwerker, A.L., Roering, J.J. & Schmidt, D.A., 2013. Controls on the seasonal deformation of slow-moving landslides. *Earth Planet. Sci. Lett*, 1, 239–247.
- Hooper, A., P. Segall and H. Zebker., 2007. Persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar for crustal deformation analysis, with application to Volcan Alcedo, Galapagos. *Journal of Geophysics and Remote Sensing* 112, B07407.
- Kazeev, A. & Postoev, G., 2017. Landslide investigations in Russia and the former USSR. *Natural Hazards*, 88(1), 81-101.
- Lazceky, M., Canaslan, C, F., Hiavacoca, I. & Gurboga, S., 2015 .Practical application of satellite- based SAR interferometry for the Detection of landslide activity. *Procedia Earth and Planetary Science*, 15, 613 – 618.
- Li, Y. & Mo, P., 2019. A unified landslide classification system for loess slopes. *Geomorphology*, 340, 67-83.
- Liu, S., Segoni, S., Raspini F., Yin, K., Zhou, C., Zhang, Y. & Casaglim, N., 2020. Satellite InSAR as a New Tool for the Verification of Landslide Engineering Remedial Works at the Regional Scale: A Case Study in the Three Gorges Reservoir Area, China. *Applied sciences*, 10, 6435, 1-18.
- Liu, Z., Xu, B., Wang, Q., Yu, W. & Miao, Z., 2021. Monitoring landslide associated with reservoir impoundment using synthetic aperture radar interferometry: A case study of the Yalong reservoir. *Geodesy and Geodynamics*, 1-13.
- Samsonov, S., Dille, A., Dewitte, O., Kervyn, F. & Oreye, N., 2020. Satellite interferometry for mapping surface deformation time series in one, two and three dimensions: A new method illustrated on a slow-moving landslide. *Engineering Geology*, 266, 105471, 1-13.
- Sarkar, S., 1999. Landslides in Darjiling Himalayas. *Japanese Geomorphological*, 20, 299-315.
- Schlogel, R., Doubre, C., Malet, J. & Masson, F., 2015. Landslide deformation monitoring with ALOS/PALSAR imagery: A DInSAR geomorphological interpretation method. *Geomorphology*, 231, 314 – 330.
- Saito, H., Korup, O., Uchida, T., Hayashi, S. & Oghuchi, T., 2014. Rainfall conditions, typhoon frequency, and contemporary landslide erosion in Japan. *Geology*, 42, 999-1002.
- Temme, A., Guzzetti, F., Samia, J. & Mirus, B., 2020. The future of landslides' past -a framework for assessing consecutive landsliding systems. *Landslide*, 17, 1519-1528.
- Triatmodjo, B., 2008. *Applied Hydrology*. Yogyakarta, Beta Offset.
- Thuro, K., Berner, C. & Eberhardt, E., 2006. The 1806 landslide of Goldau-200 years after the event (Der Bergsturz von Goldau 1806–200 Jahre nach dem Ereignis). *Felsbau*, 24, 59–66.

- Wang, H.B., Zhou, B., Wu, S.R., Shi, J.S. & Li, B., 2011. Characteristic analysis of large-scale loess landslides: a case study in Baoji city of loess plateau of northwest China. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11, 1829–1837.