

## تحلیل سازوکار زمین لغزش روستای باریکان شهرستان طالقان

DOR : [20.1001.1.23453915.1403.13.4.6.3](https://doi.org/10.23453/15.1403.13.4.6.3)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۱۴

پوریا حیدریان<sup>۱\*</sup>، علی اکبر سرمدی سیفی<sup>۲</sup>۱- کارشناس ارشد زمین شناسی مهندسی، گروه مخاطرات زمین شناختی، پژوهشکده سوانح طبیعی، تهران، ایران ([Phpheidaryan@gmail.com](mailto:Phpheidaryan@gmail.com))

۲- کارشناس ارشد ژئومورفولوژی، گروه مخاطرات زمین شناختی، پژوهشکده سوانح طبیعی، تهران، ایران

## چکیده

زمین لغزش از جمله بلایای طبیعی است که عمدتاً در مناطق کوهستانی رخ می دهد و باعث برهم ریختگی مورفولوژی منطقه می شود و خسارات عمده به مناطق مسکونی، جاده ها و زمین های کشاورزی و غیره وارد می کند. به همین دلیل پدیده زمین لغزش و سازوکارهای آن می بایست مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد. این مقاله به بررسی علل ناپایداری دامنه های در محدوده روستای باریکان واقع در شهرستان طالقان استان البرز می پردازد. روستای باریکان در دوره های زمانی مختلف از اوایل دهه ۱۳۸۰ تا اوایل سده جدید به تناوب دچار ناپایداری حرکات دامنه ای شده است که شدیدترین آن پس از یک دوره بارانی غیرمعمول در اواخر زمستان سال ۱۳۹۷ و اوایل بهار سال ۱۳۹۸ رخ داده و سبب ایجاد خسارات قابل توجهی در ساختمان های موجود در بافت قدیم روستا و سایر مناطق موجود در روستا شده است. این پژوهش حاصل نتایج مطالعات پایدارسازی است که از طریق بازدید و مشاهده میدانی از روستای باریکان و برداشت های زمین شناسی صورت گرفته است. به منظور تکمیل مطالعات و به دست آوردن خصوصیات مقاومتی مصالح زمین شناسی موجود در محدوده زمین لغزش روستا، مطالعات ژئوتکنیکی و ژئوفیزیکی با استفاده از آزمایش های شناسایی ساخت گاه، طراحی و اجرا شده است. در ادامه، به تحلیل داده های بارندگی برای تجزیه و تحلیل عددی پایداری شیب و تغییرات سازوکار شکست شیب قبل و بعد از بارندگی پرداخته شده است. نتایج مطالعات به دست آمده بیانگر آن هستند که ضریب ایمنی پس از یک دوره ۲ ماهه بارندگی با شدت بارندگی حدود ۵ برابر میانگین بلندمدت کاهش چشمگیری می یابد. در نهایت، عملکرد دو استراتژی بهبود پایداری شیب برای کاهش خطر زمین لغزش مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج این مطالعه می تواند چشم اندازی در مورد تأثیرات تغییرات بارندگی در ایران برای طراحی های ژئوسیستم آینده، پیش بینی خطرات زمین و انتخاب استراتژی های کاهش زمین لغزش ناشی از بارندگی فراهم کند.

واژه های کلیدی: زمین لغزش، تحلیل پایداری، بارندگی، سازوکار

## Analysis of the Landslide Mechanism in Barikan Village, Taleghan County

Pouria Heidaryan<sup>\*1</sup>, Aliakbar Sarmadi Syfi<sup>2</sup>1. Msc. Engineering Geology, Dept. of Geological Disasters, Natural Disasters Research Institute, Tehran, Iran. (Corresponding Author: [Phpheidaryan@gmail.com](mailto:Phpheidaryan@gmail.com))

2. Msc. Geomorphology, Dept. of Geological Disasters, Natural Disasters Research Institute, Tehran, Iran.

## Abstract

Landslides are natural disasters that occur mainly in mountainous areas and cause, disruption to the morphology of the region and cause major damage to residential areas, roads, agricultural lands, etc. For this reason, the landslide phenomenon and its mechanisms must be analyzed. This article examines the causes of slope instability in Barikan village, located in Taleghan County, Alborz Province. Barikan village has been experiencing intermittent instability of slope movements at different times from the early 2000s to the early 2010s, the most severe of which occurred after a stormy period in the late winter of 2018 and early spring of 2019, causing significant damage to buildings in the old village context and other areas in the village. This research is the result of



sustainability studies conducted through field visits and observations of the village of Barikan and geological surveys. To complete the studies and obtain the resistance properties of the geological materials present in the village landslide area, geotechnical and geophysical studies were designed and implemented using site identification tests. Next, rainfall data is analyzed for numerical analysis of slope stability and changes in slope failure mechanisms before and after rainfall. The results of the studies obtained indicate that the safety factor decreases significantly after a 2-month rainfall period with a rainfall intensity of about 5 times the long-term average. Finally, the performance of two slope stability improvement strategies to reduce landslide risk has been evaluated. The results of this study can provide insights into the impacts of rainfall changes in Iran for future geosystem designs, land hazard prediction, and the selection of rainfall-induced landslide mitigation strategies.

**Keywords:** Landslide, Stability analysis, Rainfall, Mechanism.

## ۱- مقدمه

زمین لغزش به عنوان یکی از مهم ترین مخاطرات طبیعی برای سکونت انسان در سراسر جهان شناخته می شود. وقوع این رویداد در مناطق آسیب پذیر و مراکز پرجمعیت می تواند آسیب های جدی به جنبه های مختلف زندگی بشر وارد کند. زمین لغزش ها علاوه بر مرگ و میر بالا، باعث آسیب یا تخریب در مراکز شهری و صنعتی می شوند [۱]. تغییرات آب و هوایی می تواند به طور قابل توجهی بر شدت، دوره بازگشت و مدت رویدادهای شدید بارش تأثیر بگذارد. تغییرات ایجاد شده در ویژگی های بارش می تواند رفتار یک دامنه را به سمت شرایط ناپایداری تغییر دهد. در سال های اخیر زمین لغزش های زیادی در سراسر جهان گزارش شده است که بارش های شدید عامل اصلی گسیختگی در آن ها بوده است. زمین لغزش های ناشی از بارندگی خسارات قابل توجهی به زیرساخت های مناطق تحت تأثیر وارد کرده و باعث ایجاد تلفات زیادی در سراسر جهان شده است. به عنوان مثال، رانش زمین ناشی از باران در آرانیایکای سریلانکا در سال ۲۰۱۶ رخ داد که منجر به کشته شدن ۱۲۷ نفر و تخریب ۷۵ خانه شد [۲].

در اسفند ۱۳۹۷ زمین لغزشی به عرض ۴۰ متر با حجم تقریبی ۳۵۰۰۰ مترمکعب باعث جابجایی و گسیختگی خط لوله گاز شهرستان طالقان در استان البرز شد که در نتیجه آن گازرسانی به بیش از ۱۲۰۰۰ کاربر متوقف شد،

وقوع زمین لغزش در این منطقه پس از بارندگی شدید در شهرستان اتفاد [۳]؛ بنابراین، ترکیبی از یک دوره بارانی غیرمعمول و یک زمین لغزش می تواند منجر به یک فاجعه پرهزینه شود، خصوصاً زمانی که سازوکار گسیختگی / شروع آن رخداد<sup>۱</sup> به درستی پیش بینی نشده باشد.

## ۲- روش تحقیق

جنبه های مختلف پدیده زمین لغزش از جمله موارد مربوط به علل، عوامل محرک و اولویت تأثیر آن ها بررسی شده است [۴، ۵]. پارامترهای مربوطه برای حساسیت شیب [۶]، توسعه سامانه های هشداردهنده [۷]، ارائه نقشه حساسیت زمین لغزش برای استفاده در برنامه های توسعه شهری [۸]، تثبیت شیب و اقدامات کاهش عمل شده برای زمین لغزش های فعال شده بر اساس اولویت بندی عوامل [۹] و در نهایت مطالعات موردی در زمینه های متعدد و سناریوهای شکست آن ها [۱۰، ۱۱] از جمله مواردی هستند که توسط محققین مختلف مورد بررسی قرار گرفته اند. همچنین محققین دیگر سازوکارهای گسیختگی زمین لغزش های ناشی از بارندگی را به منظور دستیابی به پیش بینی مناسب رفتار گسیختگی دامنه ها مورد بررسی قرار داده اند [۱۲، ۱۳].

به طور کلی رویکردهای مختلفی در این زمینه مورد استفاده قرار گرفته است از جمله: (۱) روش های

<sup>1</sup> Triggering

تحلیلی [۱۴] ۲) مدل‌های نیمه تجربی که آستانه بارندگی را برای شروع زمین‌لغزش نشان می‌دهد [۱۵] ۳) مدل‌سازی فیزیکی [۱۶، ۱۷] ۴) روش‌های عددی [۱۸، ۱۹]. روش‌های تحلیلی مبتنی بر تعیین ضریب اطمینان شیب با استفاده از یک‌راه حل تحلیلی و در نظر گرفتن تغییرات مقاومت برشی خاک ناشی از مکش ماتریکی<sup>۱</sup> است. مدل‌های نیمه تجربی با تجزیه و تحلیل رویدادهای بارندگی گذشته که باعث زمین‌لغزش شده‌اند، محاسبه می‌شوند. داده‌های آماری به ایجاد یک مدل آستانه<sup>۲</sup> از طریق تجزیه و تحلیل کمک می‌کنند. باین‌حال، تجزیه و تحلیل سازوکار واقعی یک زمین‌لغزش که در نتیجه بارندگی ایجاد شده است، تنها با استفاده از روش‌های تحلیلی و مدل‌های نیمه تجربی به دلیل ماهیت غیرقابل پیش‌بینی این نوع از زمین‌لغزش‌ها دشوار است [۱۶].

تحلیل‌های عددی می‌توانند سازوکار گسیختگی دامنه را به‌طور مناسب شبیه‌سازی کنند، زیرا برهمکنش بین فازهای جامد و سیال توسط این تحلیل‌ها به‌عنوان یک عامل مهم در مدل‌سازی زمین‌لغزش ناشی از بارندگی در نظر گرفته می‌شود [۲۰، ۲۱]. باین‌حال، تجزیه و تحلیل عددی لغزش‌های ناشی از بارندگی نیاز به مطالعه موردی برای صحت‌سنجی نتایج دارند. فقدان مطالعات موردی مناسب و پارامترهای ورودی، می‌تواند بر دقت مدل‌های عددی تأثیر بگذارد [۲۲]. بر این اساس، مطالعه موردی زمین‌لغزش‌های ناشی از بارندگی می‌تواند درک مناسبی از تعامل بین سازوکارهای گسیختگی دامنه، شدت بارندگی و خسارات وارده به سازه‌ها را برای مهندسان فراهم نماید. علاوه بر این، انتخاب روش‌های مناسب بهسازی و پایدارسازی

زمین به‌منظور کاهش دادن میزان خسارات وارده از طریق زمین‌لغزش‌ها، علاوه بر ویژگی‌های ساخت‌گاه و شرایط آن همچنین به الزامات پروژه بستگی دارد [۲۳].

تغییر اقلیم می‌تواند تأثیر متفاوتی بر الگوهای بارندگی (به‌عنوان مثال، میزان بارندگی یا مدت بارندگی) در نقاط مختلف جهان داشته باشد [۲۴]. بسیاری از مطالعات نشان داده‌اند که سازوکار شکست یک شیب می‌تواند با توجه به الگوی بارندگی محلی متفاوت باشد. واقفی و همکاران (۲۰۱۹) [۲۵] نشان دادند که ایران در سال‌های آینده دوره‌های خشک‌سالی طولانی را تجربه خواهد کرد باین‌حال، این دوره‌های خشک‌سالی طولانی مدت به‌طور پراکنده توسط دوره‌های بارندگی شدید قطع می‌شود. علاوه بر این، ایران به دلیل ویژگی‌های توپوگرافی و زمین‌شناسی متمایز خود با موارد متعددی از زمین‌لغزش مواجه می‌شود. بر این اساس، ارزیابی سازوکار شکست زمین‌لغزش‌های ناشی از بارندگی، می‌تواند چشم‌اندازی از اثرات تغییر اقلیم در ایران ارائه نماید این اطلاعات در طراحی ژئوسیستم‌ها، پیش‌بینی مخاطرات زمین‌شناسی و تدوین استراتژی‌های مؤثر برای کاهش وقوع زمین‌لغزش در آینده دارای اهمیت هستند.

در این مطالعه ویژگی‌ها و سازوکارهای گسیختگی زمین‌لغزش در هنگام بارندگی مورد بررسی قرار می‌گیرد. ابتدا بررسی‌های میدانی از خصوصیات زمین‌لغزش و آسیب‌های ساختاری و ژئوتکنیکی ناشی از آن مورد بررسی قرار می‌گیرد در ادامه، خصوصیات ژئوتکنیکی و ژئوفیزیکی منطقه لغزش با استفاده از آزمایش‌های برجا و آزمایشگاهی ارزیابی می‌شود. سپس، داده‌های بارندگی ارائه شده و علل احتمالی زمین‌لغزش مورد بحث قرار می‌گیرد. پس‌از آن، یک سری شبیه‌سازی عددی برای درک سازوکار

<sup>1</sup> Matric Suction

<sup>2</sup> Threshold Model

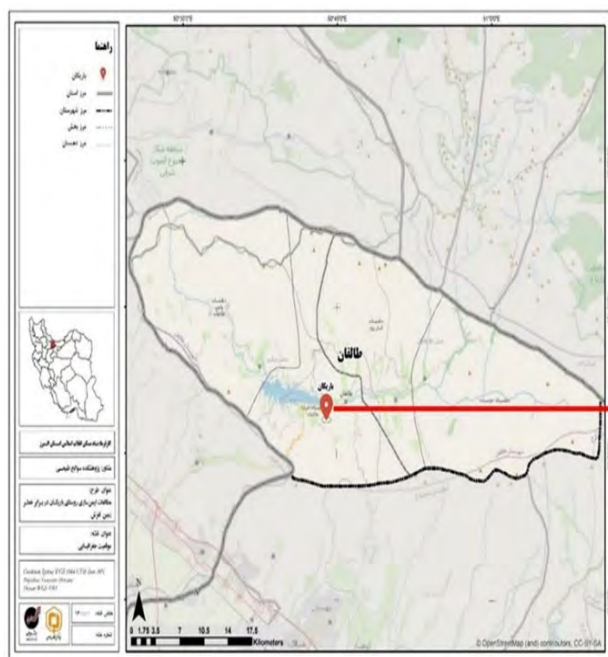
شکست زمین لغزش برای مقاطع در نظر گرفته شده در شیب با استفاده از ضریب ایمنی و تحلیل تغییر شکل (دگرشکلی) انجام شد. علاوه بر این نتایج به دست آمده با خسارات مشاهده شده مقایسه می شوند. در نهایت، عملکرد روش های پایداری سازی زمین لغزش برای بهبود پایداری شیب، تجزیه و تحلیل و مقایسه می شوند.

### ۳- ناحیه مورد مطالعه

زمین لغزش باریکان در روستای باریکان از توابع شهرستان طالقان در استان البرز به مختصات جغرافیایی  $36^{\circ} 09' 17''$  شمالی و  $50^{\circ} 44' 50''$  شرقی قرار دارد (شکل ۱). روستای باریکان بر روی یک دامنه شرقی - غربی نسبتاً ناهموار با پستی و بلندی های نسبتاً زیاد و مشرف به سد طالقان قرار گرفته است در بخش غربی روستا رودخانه فصلی باریکان قرار دارد که از سمت غرب به طرف رودخانه طالقان و سد طالقان جریان می یابد.

در شکل ۱ موقعیت روستا و منابع آب سطحی پیرامون آن مشاهده می شود. خطوط منحنی

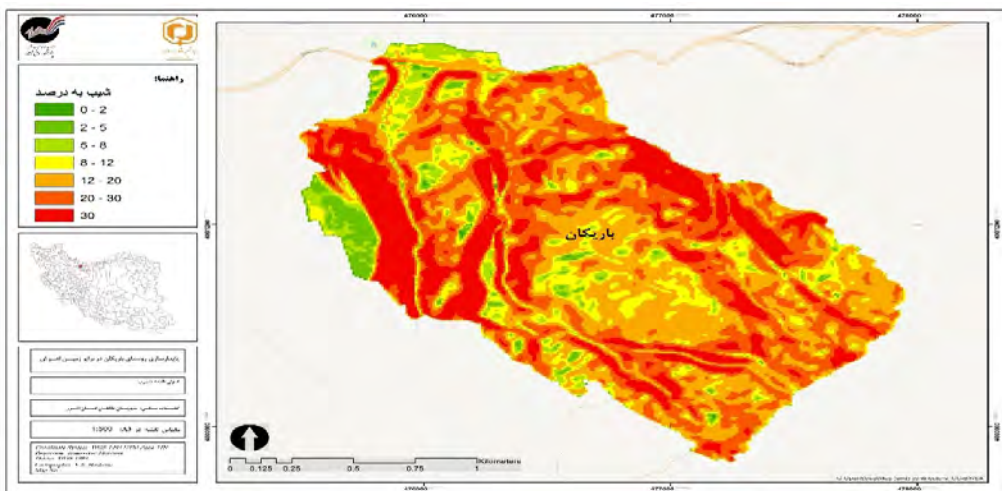
میزان توپوگرافی منطقه مورد مطالعه در شکل ۲ نشان داده شده است. همان طور که در شکل ۲ (الف) مشاهده می شود مرکز روستای باریکان در ارتفاع ۱۹۱۲ متری از سطح دریا واقع شده است. کمترین مقدار ارتفاع ۱۸۵۹ متر و بیشترین تراز ارتفاعی ۲۰۲۹ متر است. با توجه به نقشه طبقات شیب، بافت مسکونی روستا در محدوده با شیب ۷ تا ۱۲ درصد قرار دارد، هر چند در برخی قسمت ها به ویژه در حاشیه های مشرف به رودخانه باریکان و آبراهه های داخل بافت روستا، شیب دامنه ها افزایش یافته است اما به صورت کلی شیب غالب منطقه مورد مطالعه از جنوب به سمت شمال است. روستا از نظر ساختار توپوگرافی بر روی یک دامنه به هم ریخته و دارای پستی و بلندی های نسبتاً زیاد قرار دارد و این ویژگی سبب شده که شیب های موضعی بیشتر شود. بر اساس نقشه شیب استخراج شده، محدوده های غربی روستا دارای شیب بیش از ۱۵ درصد هستند (شکل ۲ ب) بنابراین تنوع و پیچیدگی ساختار توپوگرافی در این محدوده پتانسیل وقوع زمین لغزش را افزایش داده است.



شکل ۱- نقشه موقعیت روستای باریکان بر روی نقشه تقسیمات سیاسی شهرستان طالقان



الف



ب

شکل ۲- نقشه توپوگرافی (الف) و شیب (ب) روستای باریکان

تضاد آب‌وهوایی شمالی - جنوبی در این رشته‌کوه که به‌وضوح در پوشش گیاهی مناطق، جنس و بافت خاک و دیگر علائم محیطی مشهود است، لذا ویژگی اقلیمی این منطقه متأثر از موقعیت قرارگیری آن است [۲۶].

بر اساس آمار و داده‌های درازمدت ایستگاه‌های هواشناسی، میانگین دما و بارندگی در منطقه مورد مطالعه به ترتیب برابر با ۱۲ درجه سانتی‌گراد و ۴۱۲ میلی‌متر است [۲۶]. همچنین بیش از ۵۰ درصد از کل بارندگی سالانه در بازه زمانی آبان ماه تا اردیبهشت‌ماه رخ می‌دهد. بر اساس بازدید میدانی صورت گرفته از منطقه مورد

از نظر ژئومورفولوژی محدوده زمین‌لغزش روستای باریکان بر روی واحدهای تپه‌ای قرار گرفته است. رخساره دامنه لغزشی عمدتاً دامنه‌های منظم (رخساره hrc است [۲۶]. مهم‌ترین ویژگی این دامنه برون‌زد سنگی کمتر از ۲۵ درصد و ضخامت خاک نسبتاً زیاد است. در اغلب نقاط این رخساره پوشش خاکی که پراکندگی قابل توجهی در منطقه مورد مطالعه دارد، دارای قابلیت فرسایش‌پذیری و رسوب‌زایی بالایی است و در بخش‌هایی از منطقه فرسایش شیاری در آن دیده می‌شود. با توجه به موقعیت قرارگیری روستا در رشته‌کوه‌های البرز و وجود



مطالعه و همچنین داده‌های کتابخانه‌ای موجود مشخص می‌شود زمین لغزش باریکان بر روی یک پهنه لغزشی قدیمی نسبتاً بزرگ که دارای طول بیش از ۵۶۴۸ متر و عرض متوسط ۳۳۰۰ متر است (شکل ۳(الف)) قرار دارد. این زمین لغزش یک زمین لغزش مرکب و پیچیده است و از گستردگی بالایی برخوردار است.

بررسی‌های میدانی نشان می‌دهد که جنس توده لغزشی متغیر و دارای به هم ریختگی فراوان است و از مواد درشت‌دانه (بلوک‌های سنگی سنگ‌آهک و آهک دولومیتی) تا مصالح ریزدانه در توده لغزشی دیده می‌شود که بیانگر تأثیر یک عامل ثانویه در ایجاد این گستره لغزشی قدیمی است.

بر اساس ابعاد و به هم ریختگی مواد تشکیل‌دهنده آن نقش تکتونیک و وقوع یک زمین لرزه تاریخی در ایجاد آن محتمل به نظر می‌رسد. اسناد و مدارک نشان می‌دهند که شکل‌گیری روستاهای باریکان و میناوند (بالادست روستای باریکان) بعد از رخداد زمین لغزش قدیمی بوده است. به طوری که این دو روستا بر روی توده لغزشی اولیه بنا و استقرار پیدا کرده‌اند [۲۶].

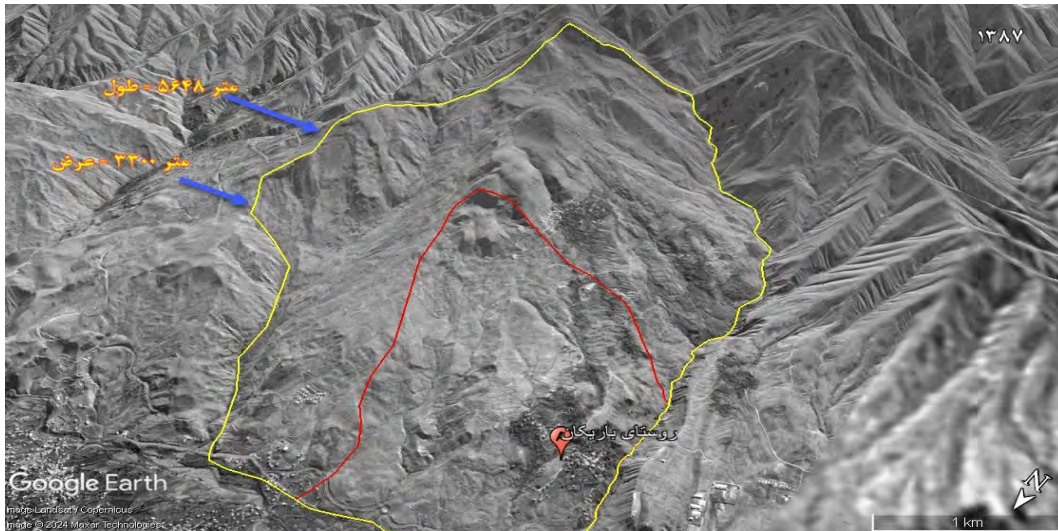
در گستره زمین لغزش قدیمی زمین لغزش‌های دیگری با ابعاد کوچک‌تر در زمان‌های مختلف رخ داده است که در شکل ۳ (ب) مشاهده می‌شوند. در محدوده بافت روستا (محدوده ورودی روستا) در سال‌های ۱۳۸۶-۱۳۸۷ زمین لغزش دیگری به صورت محلی مجدداً فعال شده است و خساراتی به واحدهای مسکونی وارد کرده است (شکل ۳ (ب)) [۲۶]. بعد از این زمین لغزش اقدامات پایدارسازی از جمله حفر زهکش‌های عمودی در نقاط مختلف روستا انجام شد و به صورت موقت از میزان حرکت دامنه لغزشی کاسته شد اما در بلندمدت دامنه در حال حرکت تدریجی بوده است که تأثیر آن در طول

زمان عمدتاً بر روی دیوار واحدهای مسکونی قابل شناسایی بوده است به همین دلیل از آن سال به بعد از هرگونه ساخت‌وساز جدید در بافت قدیم و آسیب‌دیده روستا ممانعت به عمل آمد و تمامی ساخت‌وسازهای جدید به مناطقی که در شمال و شرق بافت قدیم قرار دارند منتقل شده است (هیچ‌گونه توجهی به زمین لغزش قدیمی منطقه نشده بود) (شکل ۴).

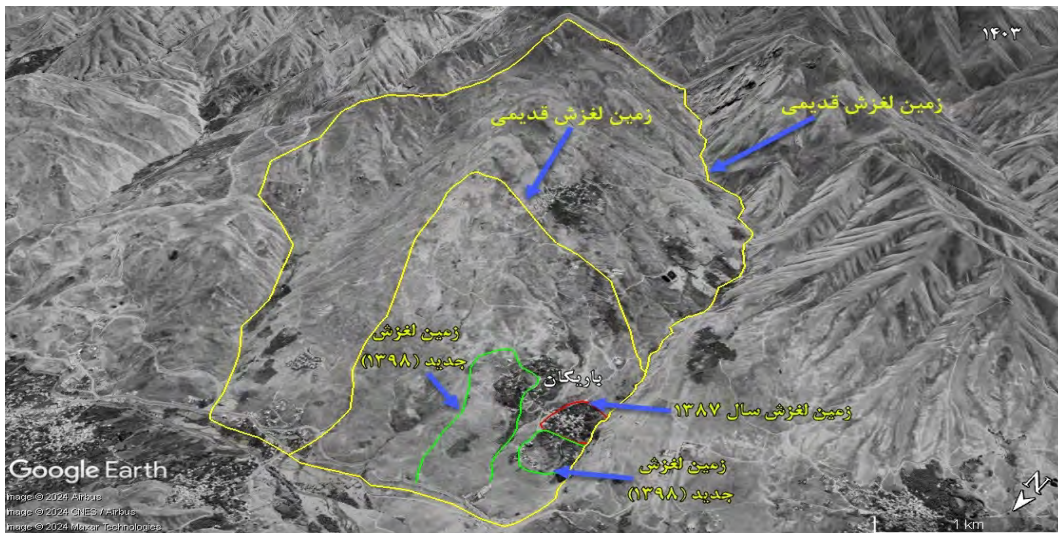
در سال ۱۳۹۸ بعد از بارندگی‌های شدید فروردین‌ماه علاوه بر بافت قدیم، مناطق جدید روستا هم دچار ناپایداری شدند و خساراتی به واحدهای مسکونی آن مناطق وارد آمد. روستای باریکان از دیدگاه سطح خطر لرزه‌ای بر اساس ویرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰ در منطقه با خطر نسبی خیلی زیاد قرار می‌گیرد و شتاب مبنای طرح آن برابر با  $0/35 g$  است که در شکل ۵ موقعیت منطقه مورد مطالعه بر روی نقشه پهنه‌بندی خطر لرزه‌ای نشان داده شده است بر این اساس، یک زلزله می‌تواند جابجایی لغزشی قابل توجهی در منطقه ایجاد کند [۳۱، ۳۰، ۲۹، ۲۷].

### ۳-۱- مشخصات زمین لغزش

مناطق لغزشی قدیمی و حال حاضر منطقه در شکل ۳ (ب) نشان داده شده است. برداشت‌های میدانی نشان می‌دهند که خصوصیات زمین لغزش باریکان با رفتار زمین لغزش انتقالی همخوانی دارد [۳۲]. همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود طول و مساحت بزرگ‌ترین زمین لغزش جدید باریکان به ترتیب برابر با ۱۲۰۰ متر و ۳۴۴ مترمربع است که در منطقه شرقی روستا رخ داده است علاوه بر این عرض دامنه تحت تأثیر ناپایداری در این منطقه برابر با ۳۹۵ متر است در حالی که ارتفاع تاج زمین لغزش برابر با ۲۰۲۹ متر و پنجه آن که به جاده اصلی طالقان منتهی می‌شود و در ارتفاع ۱۸۱۹ متری قرار دارد.



الف



ب

شکل ۳- موقعیت زمین لغزش‌های باریکان (الف) سال ۱۳۸۷ (ب) سال ۱۴۰۳



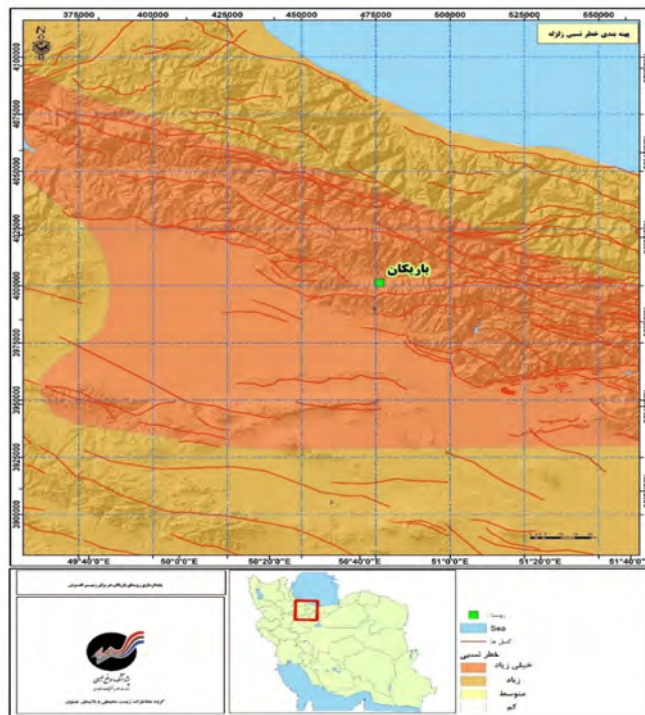
۹۵  
شماره ۲۸  
زمستان ۱۴۰۳  
فصلنامه علمی  
و پژوهشی



تحلیل سازوکار زمین لغزش روستای باریکان شهرستان طالقان / پوریا  
حیدریان، علی‌اکبر سرمدی سینی



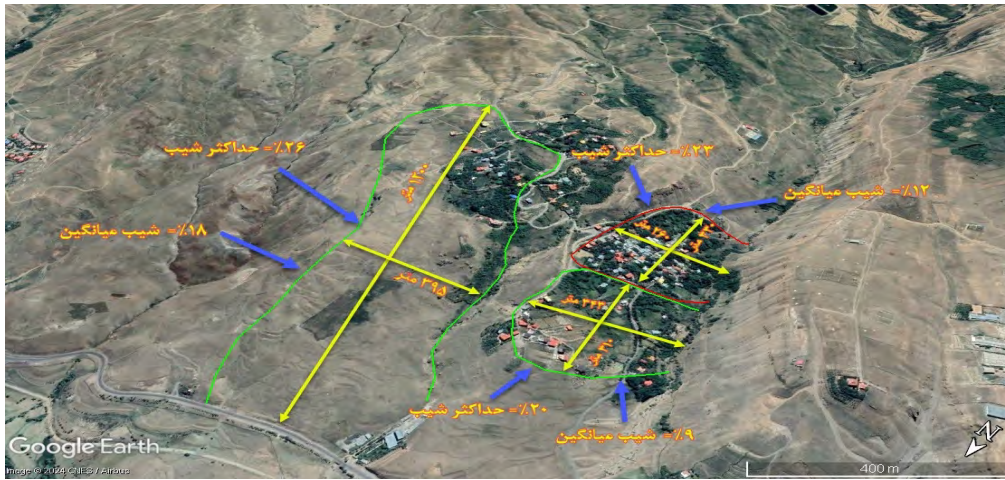
شکل ۴- مناطق مختلف روستا در بازه‌های زمانی مختلف الف) سال ۱۴۰۳ ب) سال ۱۳۸۷



شکل ۳- موقعیت منطقه مورد مطالعه بر روی نقشه پهنه‌بندی خطر نسبی زلزله بر اساس استاندارد ۲۸۰۰

حداکثر شیب حدود ۲۳ درصد است اما در منطقه شمالی میانگین شیب ۹ درصد و حداکثر مقدار آن ۲۰ درصد است. منطقه شرق روستا که دارای بیشترین مقدار شیب است و مقادیر میانگین و حداکثر شیب به ترتیب برابر با ۱۸ و ۲۶ درصد است. در جدول ۱ مشخصات زمین لغزش‌های باریکان نشان داده شده است.

مجاور بافت قدیم روستا زمین لغزش دیگری قرار دارد که تاج آن در بالای دامنه‌ای قرار دارد که ارتفاع آن ۱۸۹۷ متر است و پنجه زمین لغزش به رودخانه باریکان در تراز ارتفاعی ۱۸۶۷ متر می‌رسد. زمین لغزش بافت قدیم روستا از نظر ابعاد دارای طول و عرض برابر با ۲۶۰ و ۳۳۰ متر است و شیب میانگین دامنه در این قسمت ۱۲ درصد و



شکل ۴- ابعاد زمین لغزش های باریکان

جدول ۱- مشخصات زمین لغزش های باریکان

منطقه زمین لغزش	طول (متر)	متوسط عرض (متر)	ارتفاع تاج زمین لغزش (متر)	ارتفاع پنجه زمین لغزش (متر)	میانگین شیب (%)	حداکثر شیب (%)
شرق	۱۲۰۰	۳۹۵	۲۰۲۹	۱۸۱۹	۱۸	۲۶
شمال	۳۴۳	۳۱۰	۱۸۹۷	۱۸۶۷	۹	۲۰
بافت قدیم	۲۶۰	۳۳۰	۱۹۲۹	۱۸۹۰	۱۲	۲۳

### ۳-۲- خسارات زمین لغزش

بررسی های میدانی انجام گرفته بعد از زمین لغزش های سال ۱۳۹۸ و ۱۴۰۰ نشان می دهد خسارات متعددی به زیرساخت ها و سازه های موجود در روستا وارد شده است. عمده خسارات وارده به ساختمان های مسکونی موجود در بافت روستا بوده است. ترک خوردگی دیوارها، کج شدگی تیرهای برق و غیره از عمده ترین خسارات وارده محسوب می شوند. پراکندگی خسارات در شکل ۷ نشان داده شده است. نرخ جابه جایی رخ داده در زمین لغزش باریکان زیاد نیست و در سطح زمین پرتگاه های لغزشی ایجاد شده ارتفاع نسبتاً کمی دارند. سطح خسارات ساختمان ها بر اساس دگرشکلی ایجاد شده در اجزای ساختمان طبقه بندی می شوند. پالمیسانو و همکاران (۲۰۱۹) [۳۳] یک سیستم طبقه بندی برای میزان خسارات وارده به ساختمان های بنایی و بتن مسلح پیشنهاد کردند.

بر اساس طبقه بندی پالمیسانو و همکاران (۲۰۱۹) ساختمان هایی که دارای ترک هایی با عرض ۱-۵ میلی متر در اجزای بنایی و یا ترک هایی با عرض ۱-۴ میلی متر در اجزای بتن مسلح موجود در تیرها و کف سازه داشته باشند در گروه ساختمان های با سطح خسارت متوسط یا سنگین قرار می گیرند و ساختمان هایی که دارای ترک هایی با عرض بیش از ۵ میلی متر در اجزای بنایی و یا ترک هایی با عرض بیش از ۴ میلی متر در اجزای بتن مسلح موجود در تیرها و کف سازه داشته باشند به ترتیب در سطح خسارت نزدیک به تخریب و تخریب قرار می گیرند.

به طور کلی در منطقه مورد مطالعه بیش از ۳۰ ساختمان در سطح خسارت متوسط یا سنگین و ۵ ساختمان در سطح تخریب یا نزدیک به تخریب هستند. در شکل ۸ شواهد سطحی زمین لغزش در مناطق لغزشی مختلف روستا نشان داده شده

مشاهده می-شوند. خسارات وارده به واحدهای مسکونی روستا در شکل ۸ (د) تا (ی) مشاهده می-شود.

است. در شکل ۸ (الف) تا (ج) به ترتیب پرتگاه های لغزشی که در تاج زمین لغزش بافت قدیم، منطقه شمال و شرق روستا ایجاد شده است



شکل ۵- پراکندگی خسارات ناشی از زمین لغزش در ناحیه مورد مطالعه



ب

الف



د

ج



ی

و

شکل ۶- شواهد سطحی زمین لغزش رخ داده در مناطق مختلف روستای باریکان

### ۳-۳- خصوصیات ژئوتکنیکی و زمین‌شناسی

نقشه زمین‌شناسی زمین لغزش باریکان در شکل ۹ نشان داده شده است. محدوده روستای باریکان با توجه به نقشه یک‌صد هزارم زمین‌شناسی لنکران بر روی واحدهای Q1-0 و Q1-1 قرار می‌گیرد. واحد Q1-0 عمدتاً از رسوبات کواترنر قدیمی (پلیستوسن) که شامل نهشته‌های شنی هستند تشکیل شده است و واحد Q1-1 نهشته‌های نابر جای زمین‌لغزشی هستند که بر اساس بازدید میدانی از منطقه مورد مطالعه این واحد عمدتاً شامل رسوبات درشت‌دانه در حد گراول و بولدر با زمینه‌ای از سیلت و رس است. این نهشته‌ها عموماً با سیمای دشتی در پای ارتفاعات گسترش و پراکندگی دارند و به علت تأثیر و عملکرد محدود فرآیندهای دیاژنز از سخت‌شدگی و سیمان‌شدگی کمی برخوردارند.

عناصر متشکله آن‌ها متناسب با شرایط و نوع منبع تغذیه‌کننده از ابعاد و جنس‌های متفاوت تشکیل شده است. این رسوبات در پیرامون منطقه مورد مطالعه به‌طور افقی سایر واحدها را می‌پوشاند. میزان سخت‌شدگی آن‌ها ضعیف بوده و پیرو این امر قطعات و قلوه‌های تشکیل‌دهنده آن‌ها از خمیره سیلتی-رسی و بعضاً ماسه‌ای دربرگیرنده به‌راحتی قابل جدا شدن هستند. اجزاء سازنده و خصوصیات بافتی این واحدها تحت تأثیر مشخصه‌های سنگ‌شناسی رخساره‌های تغذیه‌کننده و مجموعه شرایط زمین‌ساختی حاکم بر منطقه است. این اراضی به اقتضای شرایط تشکیل و محیط رسوب‌گذاری بافت بسیار متغیر دارند.

گسل‌های موجود در منطقه مورد مطالعه به تبعیت از پهنه ساختاری البرز عموماً دارای روند غربی - شرقی بوده و عملکرد آن‌ها معکوس با مؤلفه امتداد لغز و تعدادی نیز امتداد لغز است. در

شکل ۱۰ نقشه گسل‌های عبوری در شعاع ۵۰ کیلومتری از منطقه مورد مطالعه نشان داده شده است همان‌طور که مشاهده می‌شود نزدیک‌ترین گسل از منطقه گسل طالقان است. گسل طالقان به‌عنوان یک گسل لرزه‌زا شناخته می‌شود که سابقه وقوع زمین‌لرزه‌های تاریخی و دستگامی در منطقه را دارد (بربریان و همکاران، ۱۳۷۱) این گسل علاوه برداشتن مؤلفه اصلی راستا لغز چپ‌بر دارای مؤلفه عادی نیز است (نظری، ۲۰۰۶).

مطالعات زیرسطحی شامل ژئوفیزیک و ژئوتکنیک به‌منظور شناسایی دقیق ساختارها، واحدهای زمین‌شناسی و تعیین خصوصیات ژئوتکنیکی مصالح زمین‌شناسی در منطقه مورد مطالعه طراحی و اجرا شده است. مطالعات ژئوفیزیک انجام شده به روش ژئوالکتریک و آرایه دوقطبی - دوقطبی<sup>۱</sup> به منظور تعیین مقاطع مقاومت ویژه الکتریکی، تعیین ضخامت خاک، تعیین سطح لغزش (در صورت امکان) و گسل‌های احتمالی در منطقه انجام شد. پروفیل‌های برداشت الکترودی و مقاطع مقاومت ویژه الکتریکی به‌دست آمده از منطقه در شکل ۱۱ نشان داده شده است. پروفیل‌های برداشت الکترودی عمود بر جهت شیب انتخاب شده‌اند چراکه در این شرایط جریان به‌صورت یکنواخت و بدون تأثیر توپوگرافی به درون زمین نفوذ می‌کند [۳۴].

بر اساس نتایج این مطالعات و مقاطع به‌دست آمده مشخص شد که سطح آب زیرزمینی در روستا بالا است و تا عمق ۳۰ متری از سطح زمین، لایه با مقاومت ویژه بالا که بیانگر سنگ‌بستر سخت باشد مشاهده نشود. علی‌محمدلو و همکاران (۲۰۱۴) [۳۴] در تحقیقات خود نشان دادند که در زیر سطح لغزش مصالح زمین‌شناسی به دلیل جذب آب و رطوبت

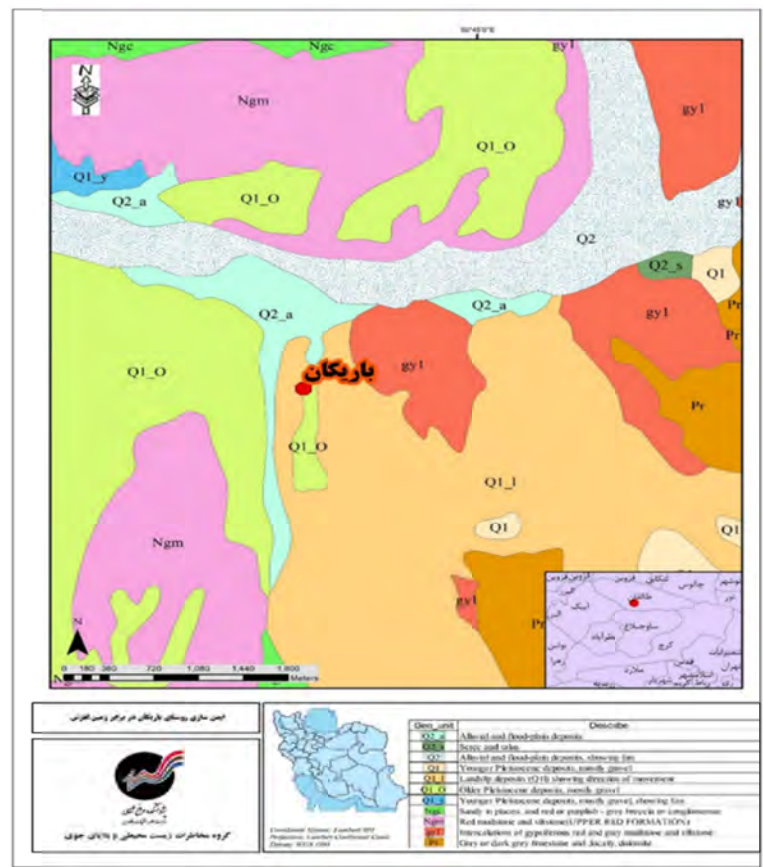
<sup>1</sup> Dipole-Dipol

بیشتر مقاومت ویژه کمتری نسبت به مصالح زمین‌شناسی بالای سطح لغزش دارند. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده و مقاطع مقاومت ویژه الکتریکی تعیین شده در مناطق مختلف روستا، سطح لغزش رخ داده در مناطق مورد مطالعه دارای اعماق مختلفی هستند به طوری که برای بافت قدیم روستا سطح لغزش در بالای دامنه در عمق ۱۲ متری و در پایین دست دامنه در عمق ۹ متری پیش‌بینی می‌شود (شکل ۱۱ (د)). در منطقه لغزشی شمال روستا سطح لغزش در عمق ۷ متری (شکل ۱۱ (ب)) و در منطقه لغزشی شرق روستا در عمق ۱۰ متری پیش‌بینی شده است (شکل ۱۱ (ج)).

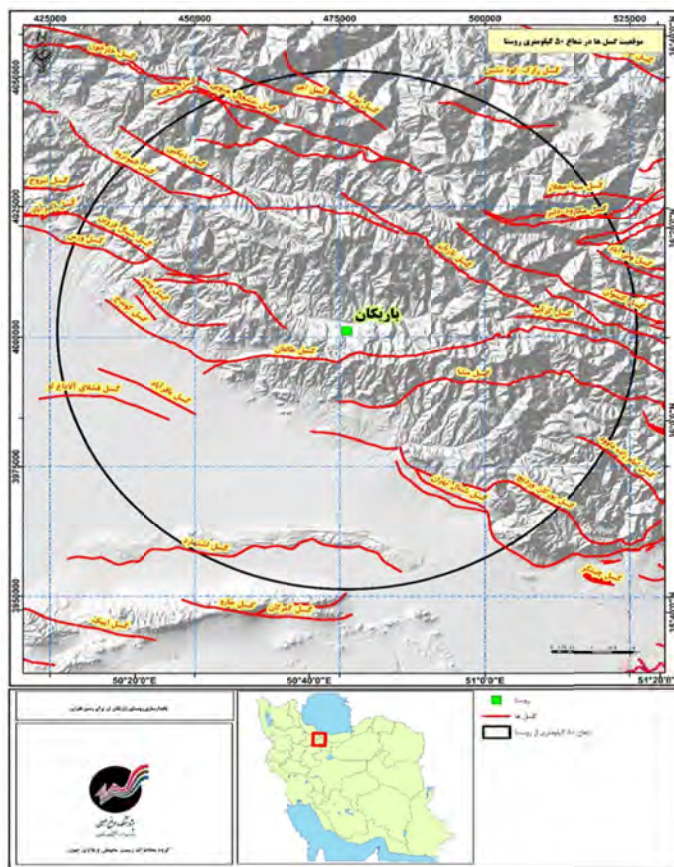
مطالعات ژئوتکنیک به منظور تدقیق نتایج مطالعات ژئوفیزیک و شناخت دقیق خصوصیات ژئوتکنیکی مصالح زمین‌شناسی موجود در منطقه مورد مطالعه طراحی و اجرا شد. سه گمانه در نقاط

مختلف روستا با مجموع عمق ۷۰ متر حفاری شد (شکل ۱۲) و آزمایش‌های ژئوتکنیکی مختلف شامل آزمون‌های فیزیکی و مکانیکی بر روی نمونه خاک‌ها استخراج شده از گمانه‌ها انجام شد. خلاصه نتایج آزمایش‌های انجام شده در جدول ۲ نشان داده شده است.

بر اساس مطالعات زیرسطحی انجام شده و نتایج دانه‌بندی نمونه‌های به‌دست‌آمده از مطالعات ژئوتکنیک مصالح زمین عمدتاً از نوع GC، CL هستند که نحوه توزیع و پراکندگی آن‌ها بر اساس داده‌های به‌دست‌آمده و بازدید میدانی انجام شده به صورت پروفیل طولی است که در شکل ۱۳ نشان داده شده است. با توجه به عدم دسترسی به سنگ‌بستر در گمانه‌های حفاری شده تعیین جنس سنگ‌بستر امکان پذیر نیست به همین دلیل از عمق ۳۰ متر به پایین به عنوان سنگ‌بستر در نظر گرفته شده است.

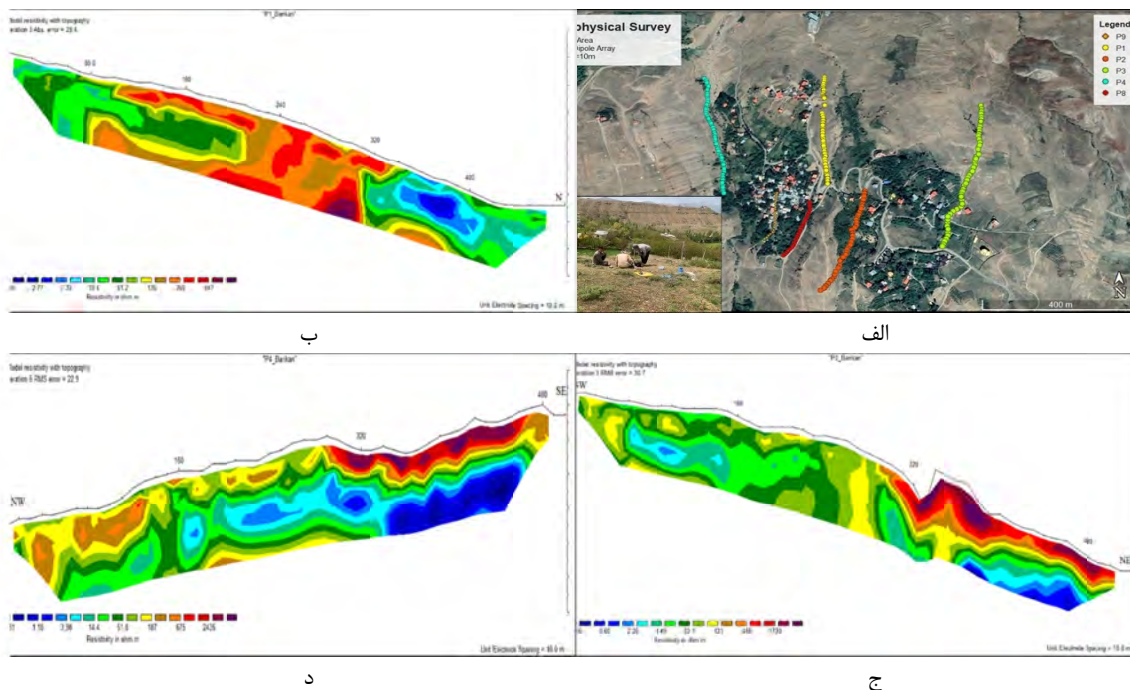


شکل ۷- نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه (برگرفته از نقشه زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ لنگران)



شکل ۸- نقشه گسل‌های شعاع ۵۰ کیلومتری منطقه مورد مطالعه

۱۰۱  
شماره ۲۸  
زمستان ۱۴۰۲  
فصلنامه علمی  
و پژوهشی  
میراث



شکل ۹- نتایج مطالعه ژئوفیزیک در منطقه مورد مطالعه الف) جانمایی کلی از پروفیل‌های مقاومت الکتریکی  
ب) پروفیل مقاومت ویژه در منطقه لغزشی شمال روستا ج) پروفیل مقاومت ویژه در منطقه لغزشی شرق روستا د)  
پروفیل مقاومت ویژه در منطقه لغزشی بافت قدیم روستا [۲۶]

تحلیل سازوکار زمین لغزش روستای باریکان شهرستان طالقان / پوریا  
حیدریان، علی‌اکبر سرمدی سبغی

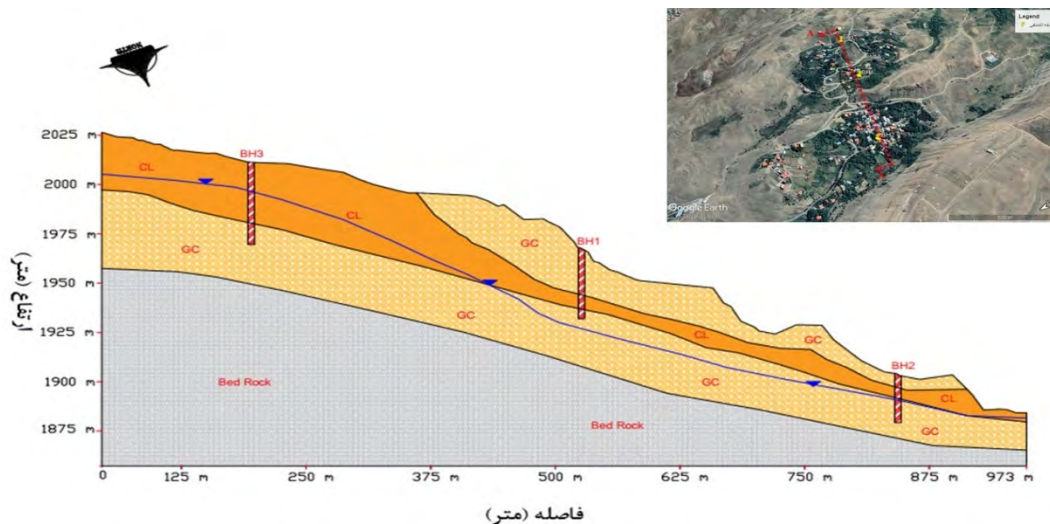


شکل ۱۰- جانمایی گمانه‌های ژئوتکنیک در منطقه مورد مطالعه

جدول ۲- خصوصیات ژئوتکنیکی نمونه‌های استخراج شده از گمانه‌های اکتشافی [۳۷]

نام گمانه			استاندارد	پارامتر
BH3	BH2	BH1		
(۱۱/۷ m) m) -CL GC(۸/۳	)m (۳/۵ SC) -m(۵/۷ CL)- m (۴ GC) - m (۳/۶ SC) -m (۳/۲ GC - )m (۳/۷ CL) -m (۶/۳ GC	- GC( ۶ m) * - CL (۴m) GC (۱۰ m)	ASTM-D422-63	دانه‌بندی
۲۰/۲۵	۱۵/۶۲	۱۸/۲	ASTM-D4318	PI(%)
۳۷	۳۲	۳۲/۲		LL(%)
۱/۷	۱/۸	۱/۷۵	ASTM-D7263	$\gamma_d(\text{gr}/\text{cm}^3)$
۱/۸	۱/۹	۱/۸۵		$\gamma_{\text{sat}}(\text{gr}/\text{cm}^3)$ $\gamma$
۲/۷	۲/۷	۲/۷	ASTM-D792	Gs
۱۳	۱۰	۱۹	ASTM-D4767-88	$C'(\text{kPa})$
۳۲	۳۳	۲۹		$\phi^\circ$
۱۵/۲	۲۰/۴	۱۶/۵		E (MPa)
۸-۱۰	۸-۱۰	۶-۱۰	معادله Hazen(1911)	K (m/s)
۰/۳	۰/۳	۰/۳۵	-	$U$

\* ضخامت لایه



شکل ۱۱- مقطع زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

#### ۴- بحث

##### ۴-۱- داده‌های بارش جوی

شکل ۱۴ نشان‌دهنده توزیع بارندگی در منطقه باریکان است. شکل ۱۴ (الف) نشان‌دهنده شدت بارش در منطقه مورد مطالعه در بازه زمانی آبان ماه (۱۳۹۷) تا اردیبهشت‌ماه (۱۳۹۸) است که حداکثر شدت بارندگی در فروردین‌ماه ۱۳۹۸ رخ داده است و بیشترین مقدار جابه‌جایی اتفاق افتاده در روستا هم در این زمان گزارش شده که منجر به وقوع زمین‌لغزش شده است. بر اساس شکل ۱۴ (الف) مشاهده می‌شود که بیشترین مقدار بارندگی‌های غیرعادی در یک بازه چهارماهه رخ داده است به طوری که نرخ بارندگی در این مدت بسیار بیشتر از مقدار میانگین بلندمدت منطقه است.

شکل ۱۴ (ب) مقدار بارندگی روزانه در فروردین‌ماه ۱۳۹۸ را نشان می‌دهد. بیشترین مقدار و شدت بارندگی از پنجم تا سیزدهم فروردین‌ماه ثبت شده است. شکل ۱۴ (ب) نشان می‌دهد که نرخ بارندگی در این ماه حدود ۴ برابر نرخ میانگین بارندگی بلندمدت در منطقه است به‌عنوان مثال از پنجم تا سیزدهم فروردین حدود ۱۲۹ میلی‌متر بارندگی در منطقه رخ داده است.

گازتی و همکاران (۲۰۰۸) [۱۵] در تحقیقات خود نشان دادند که می‌توان آستانه بارندگی برای شروع یک زمین‌لغزش را از رابطه (۱) تعیین کرد.

$$I = 2.2D^{-0.44} \quad (1)$$

ژیا و همکاران (۲۰۲۰) [۳۵] با استفاده از داده‌های بارش مبتنی بر ماهواره و همچنین کاتالوگ جهانی زمین‌لغزش‌های رخ داده در جهان از جمله زمین‌لغزش‌های رخ داده در ایران، رابطه‌ای را برای تعیین آستانه نرخ بارش منجر به زمین‌لغزش در مقیاس جهانی ارائه کردند.

$$I = 0.99D^{0.7} \quad (2)$$

که در روابط (۱) و (۲)، I شدت بارندگی در واحد (mm/hr) و D دوره بارندگی به ازای ساعت (hr) یا روز (days) هستند. بر اساس روابط (۱) و (۲) آستانه بارندگی برای شروع زمین‌لغزش در منطقه باریکان به ترتیب برابر با 15/0 (mm/h) و 54/66 (mm/d) تخمین زده می‌شود که بر اساس شکل ۱۴ (ب) در دوازدهم فروردین 45 (mm/d) بارندگی رخ داده است بنابراین در منطقه مورد مطالعه پتانسیل وقوع زمین‌لغزش وجود دارد.



در شکل ۱۴ (الف) نکته قابل توجه افزایش نرخ بارندگی از آبان تا اسفندماه است که به طور میانگین حدود ۸۵ میلی متر بارندگی در این مدت در منطقه رخ داده است که نسبت به میانگین بارش ماهانه منطقه حدود ۶۶ درصد افزایش نشان می دهد که با توجه به وجود مصالح زمین شناسی ریزدانه و نسبتاً نفوذناپذیر در منطقه و بالا بودن قابلیت نگهداشت آب در آن ها، درصد اشباع شدگی در آن ها با سرعت بالایی افزایش می یابد که با بارندگی ۱۶۱ میلی متری رخ داده در فروردین ماه، این اتفاق رخ داده است و فشار آب منفذی در ذرات خاک افزایش یافته و مقدار تنش مؤثر و نیروهای مقاوم برشی در مصالح زمین شناسی را کاهش داده است بنابراین دامنه های موجود در روستا به آستانه لغزش رسیده اند و لغزش رخ داده است.

با توجه به پروفیل زمین شناسی منطقه مورد مطالعه (شکل ۱۳) و قرارگیری لایه ریزدانه CL در بین دولایه GC در بالا و پایین خود، در دوره افزایش نرخ بارندگی (آبان تا فروردین ماه) و تراوش آن به درون لایه های زمین، لایه CL اشباع می شود و نرخ دگرشکلی در آن افزایش زیادی پیدا می کند.

همچنین با توجه به اختلاف نفوذپذیری بین این دولایه (لایه CL و GC)، جریان آب در بین مرز آن ها متمرکز می شود که همین امر می تواند باعث تشکیل یک سطح لغزش مستعد شود و لایه CL بر روی لایه زیرین خود حرکت کند در نتیجه به تدریج یک زمین لغزش انتقالی در منطقه مورد مطالعه رخ دهد. علاوه بر این بارش و نفوذ آن می تواند باعث تشدید لغزش دامنه ای شوند. این نوع سازوکار گسیختگی دامنه ای در زمین لغزش های رخ داده در نقاط مختلف دنیا مشاهده شده است [۳۶،۳۷].

#### ۴-۲- شبیه سازی عددی

مجموعه ای از شبیه سازی های عددی برای شناخت سازوکار گسیختگی دامنه ای رخ در روستای باریکان انجام شده است (شکل ۱۶). رفتار مصالح زمین شناسی با کمک مدل رفتاری موهر - کلمب شبیه سازی شده است. پارامترهای ورودی مدل موهر-کلمب با کمک آزمایش های ژئوتکنیکی مربوطه به دست آمده است و در جدول ۲ نشان داده شده است. شرایط تنش اولیه داخل توده خاک با کمک نرم افزار 2D PLAXIS تحت شرایط بارگذاری ثقلی تعیین شد.

مرزهای مدل ساخته شده به این صورت مدل شد که مرز پایین در تمام جهات بسته شده و دو مرز افقی در سمت چپ و راست مدل در جهت افقی بسته و در جهت قائم باز هستند. مقادیر ضریب اطمینان (FOS) با تحلیل کوپل<sup>۱</sup> دگرشکلی - جریان ارزیابی شده است. پاسخ های هیدرولیکی و مکانیکی خاک به طور هم زمان در آنالیز تغییر شکل کوپلینگ محاسبه شد. بارگذاری در سطح دامنه بر اساس شرایط واقعی در مناطقی که بافت مسکونی روستا قرار دارد اعمال شده است. مش بندی با کمک روش آنالیز حساسیت انجام شد و در مناطق لغزشی تعداد و تراکم آن افزایش یافته است. تحلیل های عددی برای مقاطع در نظر گرفته شده در شکل ۱۵ انجام شده است.

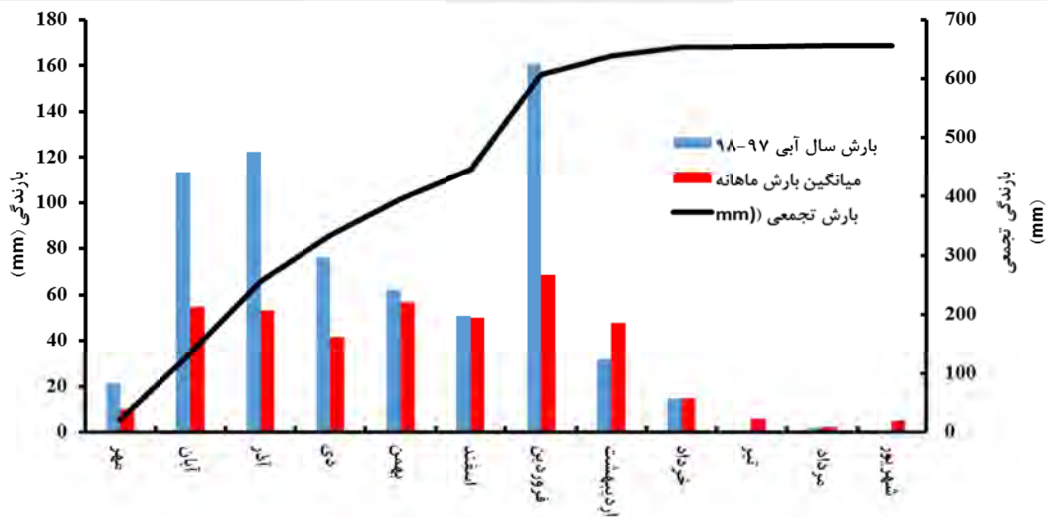
#### ۴-۳- ارزیابی تأثیر بارندگی

شدت بارندگی به صورت میانگین روزانه برای ۲ ماه اسفند و فروردین در مدل سازی دامنه مورد استفاده قرار گرفته است. مقادیر شدت بارندگی در شکل ۱۴ نشان داده شده است. حداکثر تعداد تکرار<sup>۲</sup> و حد تحمل<sup>۳</sup> به ترتیب ۱۰۰

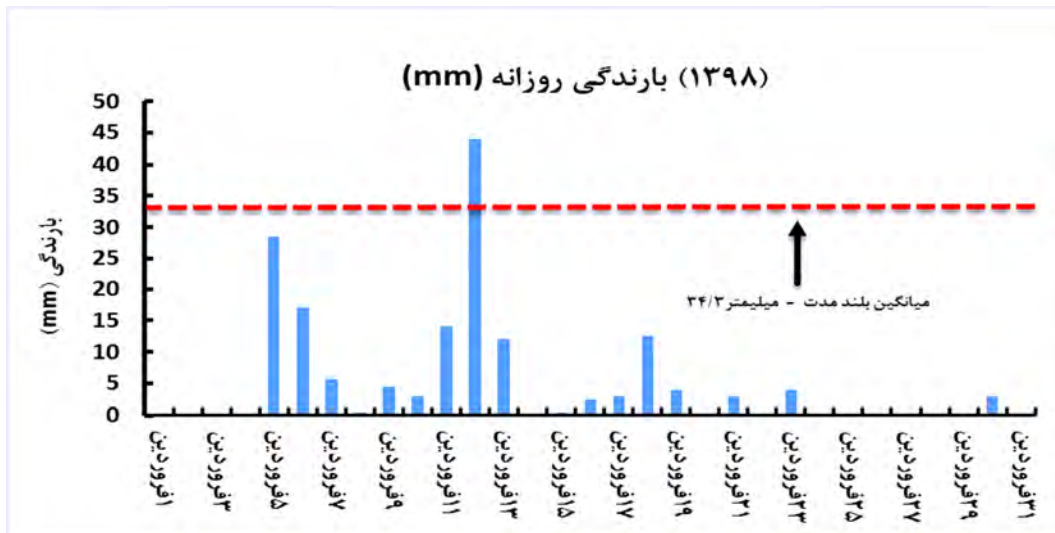
<sup>1</sup> Coupled

<sup>2</sup> Iteration

<sup>3</sup> Tolerance Limit



الف



ب

شکل ۱۲- خصوصیات بارندگی منطقه باریکان الف) بارندگی ماهانه ب) بارندگی روزانه



شکل ۱۳- موقعیت مقاطع عرضی موردنظر برای تحلیل پایداری دامنه لغزشی



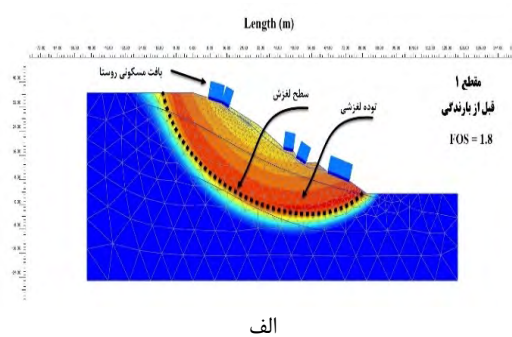
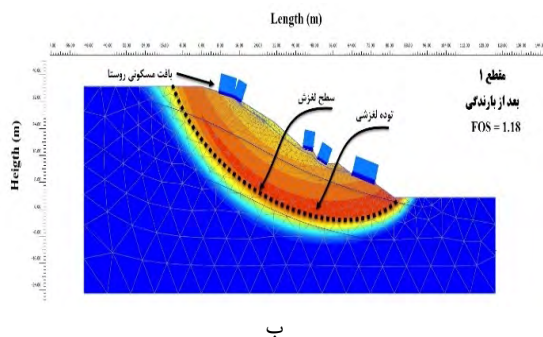
و ۰/۰۱ برای تحلیل‌های عددی فرض شده است. مقادیر ضریب اطمینان برای مقاطع در نظر گرفته شده قبل و بعد از بارندگی در شکل ۱۶ (الف تا ی) نشان داده شده است. شکل ۱۶ نشان می‌دهد که مقادیر ضریب اطمینان (FOS) قبل از بارندگی بیش از ۱/۵ است اما بعد از بارندگی ضریب اطمینان برخی از مقاطع به زیر ۱/۵ کاهش پیدا می‌کند.

بیشترین مقدار کاهش ضریب اطمینان مربوط به مقطع یک است که به زیر ۱/۲ می‌رسد به طوری که ضریب اطمینان  $FOS = 1$  نشان‌دهنده آستانه لغزش (ناپایداری) است. در این زمینه نایدو و همکاران (۲۰۱۸) [۳۸] ضریب اطمینان  $FOS < 1/2$  را به عنوان آستانه لغزش در بارندگی‌ها پیشنهاد داده‌اند. شکل ۱۶ نشان می‌دهد که برای مقاطع در نظر گرفته شده در منطقه مورد مطالعه، بعد از مقطع یک بیشترین مقدار کاهش ضریب اطمینان بعد از بارندگی مربوط به مقطع سه است بنابراین در منطقه مورد مطالعه به ترتیب بارندگی برای مقاطع یک الی سه باعث افت حدود ۳۸، ۷ و ۱۷ درصدی ضرایب اطمینان می‌شود. بر اساس نتایج به دست آمده می‌توان گفت که در مقطع یک که دربرگیرنده بافت قدیم روستا است رخ دادن زمین لغزش بعد از بارندگی‌های شدید در منطقه

مورد مطالعه اجتناب‌ناپذیر است.

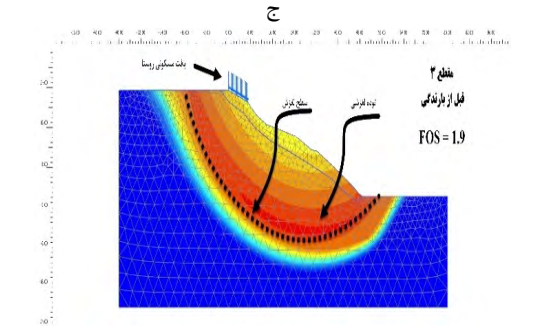
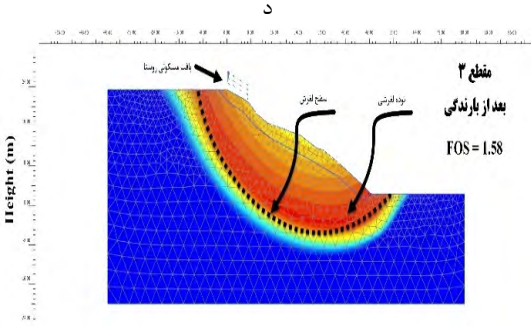
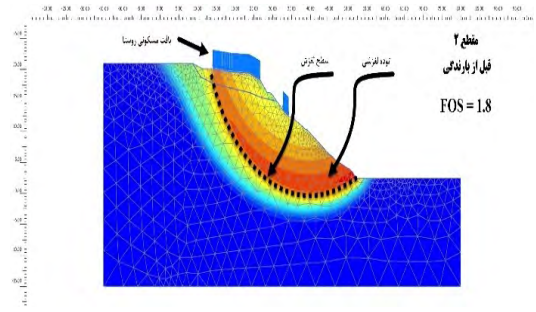
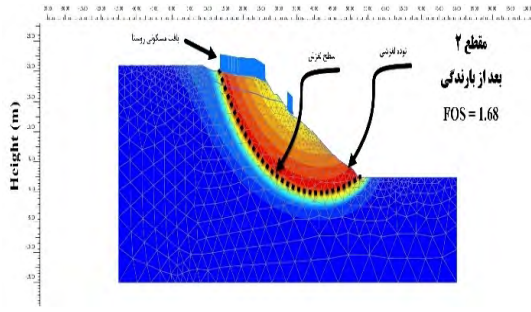
سطوح لغزش بالقوه که در شکل ۱۶ نشان داده شده‌اند بیانگر آن است که کل منطقه مورد مطالعه مستعد لغزش با عمق متوسط تا عمیق است. نتایج مدل‌سازی عددی و مقادیر ضریب اطمینان به دست آمده برای تمام مقاطع در نظر گرفته شده با واقعیت همخوانی دارد به طوری که مقطع یک که دارای کمترین ضریب اطمینان است، بیشترین خسارت را متحمل شده است و شدت و گستردگی خسارات وارده نسبت به سایر مناطق روستا بیشتر است به همین دلیل مقطع یک به عنوان بحرانی‌ترین مقطع برای تحلیل عددی دگرشکلی انتخاب شد.

شکل ۱۷ نشان‌دهنده جابه‌جایی رخ داده در اثر زمین لغزش قبل و بعد از بارندگی در مقطع یک است. شکل ۱۷ (الف) نشان می‌دهد که حداکثر جابه‌جایی رخ داده در مقطع یک قبل از بارندگی ۰/۱۵۸ سانتی‌متر است که بعد از بارندگی به حدود ۴۲/۵ سانتی‌متر افزایش پیدا می‌کند (شکل ۱۷ ب)). بر این اساس، سازه‌های واقع در این منطقه تغییر شکل‌های بزرگی در سطوح نزدیک به ریزش و ریزش (< ۵ میلی‌متر) را پس از بارندگی تجربه کردند که خسارت‌های مشاهده شده تأیید کننده آن هستند.

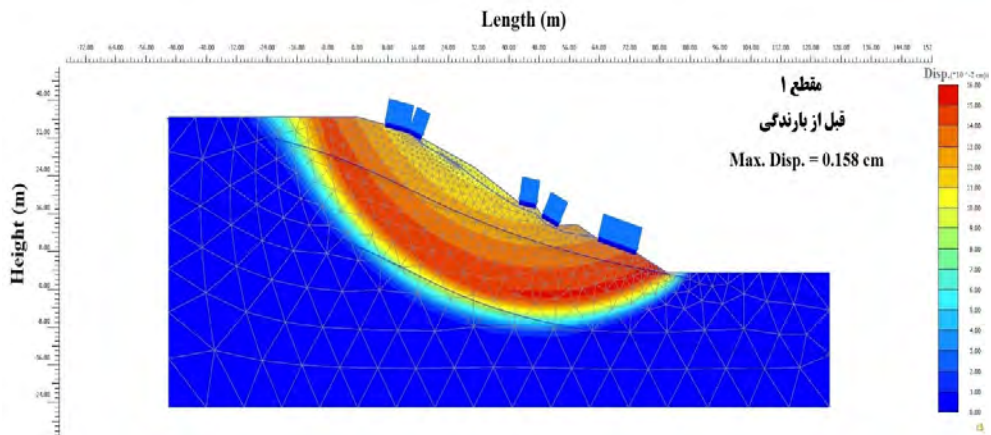


ب

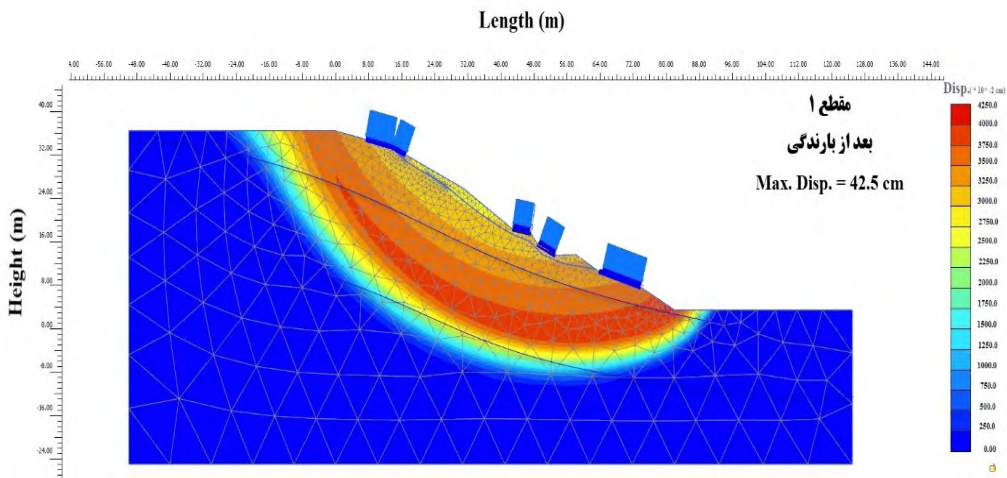
الف



شکل ۱۴- ضریب اطمینان و سطح لغزش مقاطع در نظر گرفته شده قبل و بعد از بارندگی



الف



ب

شکل ۱۵- جابه‌جایی کل رخ داده در دامنه الف) قبل از بارندگی ب) بعد از بارندگی

۱۰۷

شماره ۲۸

زمستان ۱۴۰۲

فصلنامه علمی

و پژوهشی



تحلیل سازوکار زمین لغزش روستای باریکان شهرستان طالقان / پوریا حیدریان، علی اکبر سردی سینی



#### ۴-۴- راهکارهای عملیاتی جلوگیری از

##### گسیختگی دامنه‌ها

در هنگام برنامه‌ریزی به منظور حفاظت و نگهداری از دامنه‌ها، راهبردهایی باید در نظر گرفته شوند. ارائه راه حل مناسب برای پیشگیری از گسیختگی دامنه‌ها باید بر پایه مطالعه دقیق خصوصیات آن‌ها صورت گیرد. به این منظور باید بررسی‌های محلی به همراه ارزیابی‌های جامع شرایط کلی منطقه (مانند توپوگرافی، زمین‌شناسی، پوشش گیاهی، نوع گسیختگی و سازوکار آن، مقیاس گسیختگی و...) انجام شوند. با توجه به مقیاس گسیختگی قابل انتظار برای یک دامنه، از سه فلسفه کلی در محافظت از آن می‌توان بهره برد که شامل (۱) کاهش ریسک، (۲) ثابت نگه داشتن درجه ریسک و (۳) پرهیز از ریسک است [۳۹].

راهکارهای کنترلی (مانند مدیریت آب، بیومهندسی و عملیات خاکی) بر مبنای فلسفه ثابت نگه داشتن درجه ریسک هستند. مدیریت اصولی آب‌های محدوده دامنه یک عامل ضروری و اساسی در کنترل پایداری دامنه است. در این خصوص، سیستم‌های زهکشی مناسب از جمله مهم‌ترین فاکتورها برای پایداری دامنه‌های طبیعی و مصنوعی به شمار می‌روند. همچنین انجام عملیات زهکشی سریع و مؤثر آب‌های سطحی و زیرسطحی از روش‌های اولیه و ضروری برای پایداری دامنه‌ها محسوب می‌شوند. در اغلب موارد، با انجام عملیات خاکی نظیر برداشتن بخش ناپایدار دامنه در قسمت بالایی آن و یا خاک‌ریزی در پنجه دامنه، می‌توان به پایداری دامنه کمک نمود. کاربرد مناسب روش‌های بیومهندسی به پایداری دامنه و همچنین کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی کمک خواهد نمود. بایستی به عنوان یک راهکار کنترلی اولیه، ترکیبی از اعمال مدیریت آب و انجام عملیات خاکی به منظور حفاظت از دامنه در نظر گرفته

شود.

زمانی که مقیاس گسیختگی کوچک بوده و یا هنگامی که جابجایی زمین لغزش کم باشد، با استفاده از برخی روش‌های پیشگیرانه مبتنی بر فلسفه کاهش ریسک، از جمله اجرای سازه‌های نگهبان (دیوارهای حائل بتنی و سنگی، گابیون و...)، مهاربندی کردن (میخ-کوبی، میل مهار و...)، اقدامات حفاظتی، حفاظت از رویه دامنه و شمع کوبی کردن می‌توان به پایداری دامنه کمک نمود. در گسیختگی‌های بزرگ مقیاس، باید قبل از استفاده از راهکارهای پیشگیرانه، در برنامه‌ریزی‌ها مقوله‌هایی نظیر پایش دامنه و استفاده از راهکارهای کنترلی مدنظر قرار گیرد.

پس از ارزیابی گسیختگی قابل انتظار در دامنه و پیش‌بینی نوع سازوکار آن، بایستی با در نظر گرفتن عواملی نظیر میزان بودجه تخصیص یافته، مقرون به صرفه بودن روش و تأمین ایمنی دامنه، از یک و یا ترکیب مناسبی از راهکارها، به منظور کنترل و پیشگیری از وقوع گسیختگی استفاده شود. در صورتی که ابعاد گسیختگی مورد انتظار برای یک دامنه بسیار بزرگ باشد، امکان پایداری آن با استفاده از روش‌های پیشگیرانه و کنترلی بسیار دشوار بوده و لازم است که راهکارهای دوری از خطر بر مبنای فلسفه پرهیز از ریسک شامل جابه‌جایی روستا و سازه‌های آسیب‌دیده مدنظر قرار گیرند.

در این مقاله برای پایداری روستای بارنگان دو راهبرد جلوگیری از گسیختگی دامنه‌ها شامل روش‌های کنترلی (مدیریت آب) و پیشگیرانه (سازه‌های نگهبان) مورد بررسی قرار گرفتند. هر کدام از این روش‌ها به‌طور جداگانه مورد ارزیابی قرار گرفته و در پایان اقتصادی‌ترین و بهینه‌ترین روش به عنوان راهکار پیشنهادی ارائه می‌شود. در ابتدا روش مدیریت آب از طریق سیستم‌های زهکشی زیرسطحی در بحرانی‌ترین مقطع روستا مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این

روش یک‌رشته قنات و دو رشته زهکش طولی (زهکش‌های نیمه عمیقی که به موازات معابر احداث می‌شوند) در مقطع یک در نظر گرفته می‌شوند.

موقعیت زهکش‌ها در شکل ۱۸ (الف) نشان داده شده است. طول و عرض رشته قنات به ترتیب ۴۰ و ۱ متر در نظر گرفته شده است و زهکش‌های طولی مدنظر هم به عرض ۱ متر و در عمق ۴ الی ۶ متری از سطح زمین قرار دارند. در شکل ۱۸ (ب) عملکرد سیستم زهکشی و حرکت آب زیرزمینی موجود در دامنه به سمت آن‌ها را نشان می‌دهد و در شکل ۱۸ (ج) میزان جابه‌جایی دامنه در نتیجه عملکرد سیستم زهکشی مشاهده می‌شود.

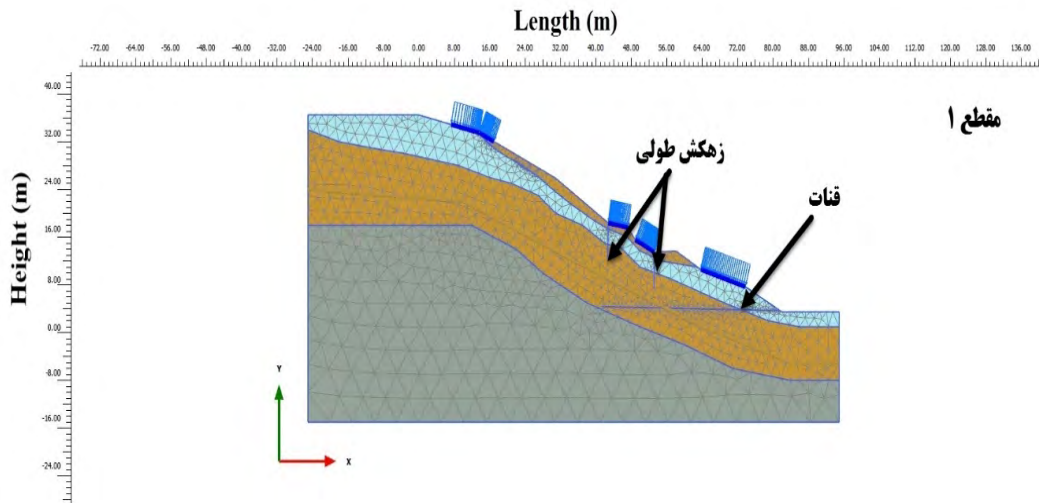
مقایسه شکل ۱۷ (ب) و شکل ۱۸ (ج) نشان می‌دهد که عمق منطقه لغزشی بعد از به‌کارگیری سیستم زهکشی کاهش پیدا می‌کند و مقادیر ضریب اطمینان دامنه افزایش می‌یابد ( $1/55 = FOS$ ) که علت آن هم کاهش فشار منفذی درون مصالح زمین‌شناسی است که باعث افزایش تنش مؤثر و مقاومت برشی درون آن‌ها می‌شود. از آنجایی که تنش مؤثر حاصل تفاضل تنش کل و فشار منفذی است و زمانی که فشار منفذی درون مواد سازنده دامنه در اثر عملکرد روش‌های مدیریت منابع آب (زهکش‌ها) کاهش می‌یابد، تنش مؤثر در بین ذرات مصالح زمین‌شناسی تشکیل‌دهنده دامنه افزایش پیدا می‌کند به عبارت دیگر با افت سطح آب در دامنه پایداری آن افزایش می‌یابد. نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد که بعد از اجرای سیستم زهکشی مقدار جابه‌جایی دامنه حدود ۵۰ درصد کاهش می‌یابد و به مقدار  $21/2$  سانتی‌متر می‌رسد که بیانگر عملکرد مناسب سیستم مدیریت آب در دامنه ناپایدار

است.

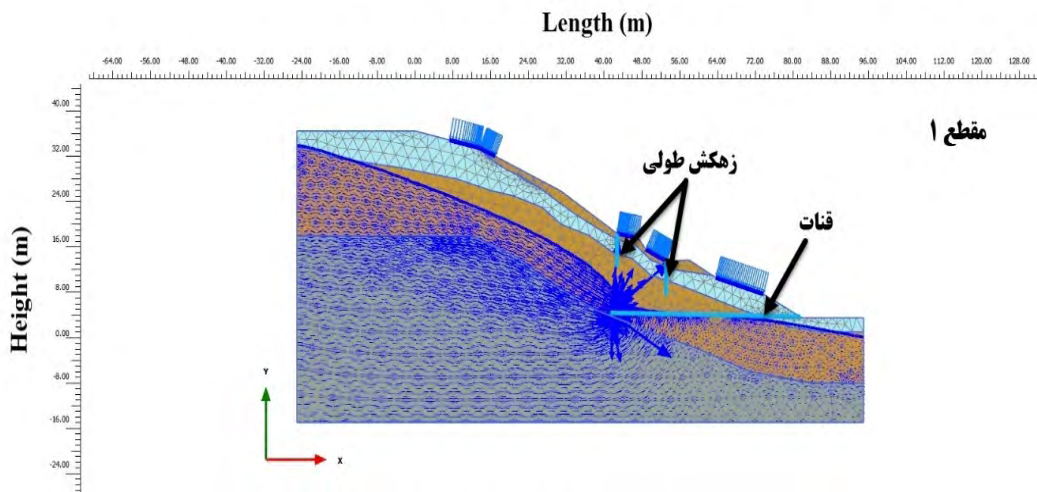
روش دوم پیشنهادی برای پایدارسازی روستای باریکان استفاده از روش‌های پیشگیرانه است. در ارائه روش‌های پایدارسازی می‌بایست به قابلیت اجرایی طرح‌های پیشنهادی در منطقه مورد مطالعه توجه کرد و روش‌هایی که دارای قابلیت اجرا هستند را مورد بررسی قرار داد. تراکم ساخت‌وساز در بافت قدیم روستای باریکان بسیار بالا (مقطع یک) است به طوری که امکان تردد وسایل نقلیه در آن‌ها ممکن نیست بنابراین اجرای روش‌های پیشگیرانه مانند شمع کوبی و میخکوبی (نیلینگ) که نیازمند ماشین‌آلات سنگین است وجود ندارد و از بین روش‌های پیشگیرانه تنها دیوار حائل قابلیت اجرا دارد به همین دلیل دیوار حائل برای این مقطع مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در شکل ۱۹ (الف) موقعیت دیوارهای حائل پیشنهادی در مناطق مختلف مقطع ۱ نشان داده شده است. برای مدل‌سازی دیوار حائل از مدل رفتاری الاستیک و پارامترهای دگرشکلی بتن شامل مدول الاستیسیته  $GPa28$  و نسبت پواسون  $0/2$  استفاده شده است. در شکل ۱۹ (ب) مشاهده می‌شود که مقدار ضریب اطمینان دامنه با دیوار حائل به‌عنوان راهکار پایدارسازی تغییر محسوسی نداشته است و تنها کمتر از ۱۰ درصد افزایش نشان می‌دهد که در مقایسه با راهکارهای مدیریت منابع آب بسیار ناچیز است (۳۱ درصد افزایش).

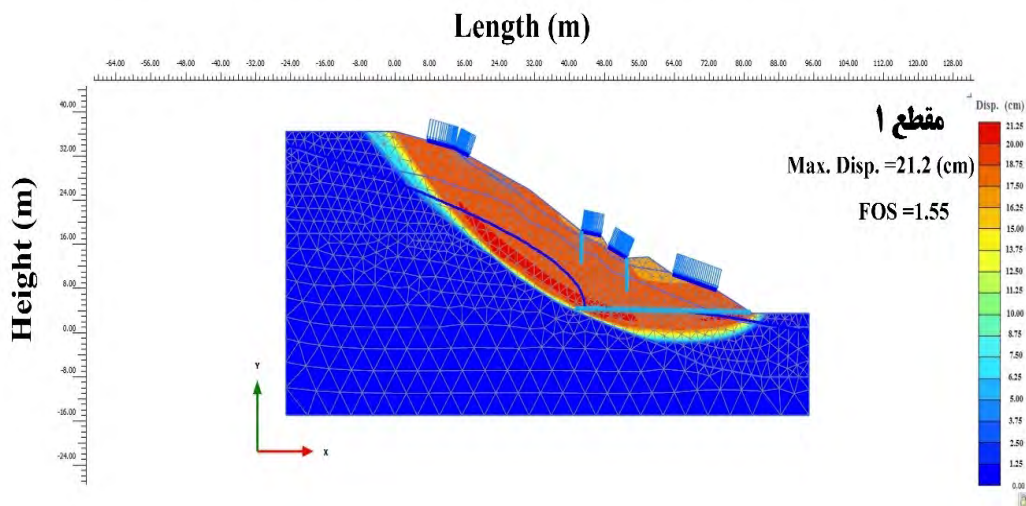
همچنین نرخ جابه‌جایی منطقه بحرانی دامنه لغزشی تغییر زیادی نشان نمی‌دهد (شکل ۱۹ (ج)) و تقریباً همان مقدار ۴۲ سانتی‌متری باقی می‌ماند که علت این موضوع می‌تواند به دلیل عمیق بودن سطح لغزش رخ داده در این مقطع باشد که در شکل ۱۶ (ب) سطح لغزش



الف

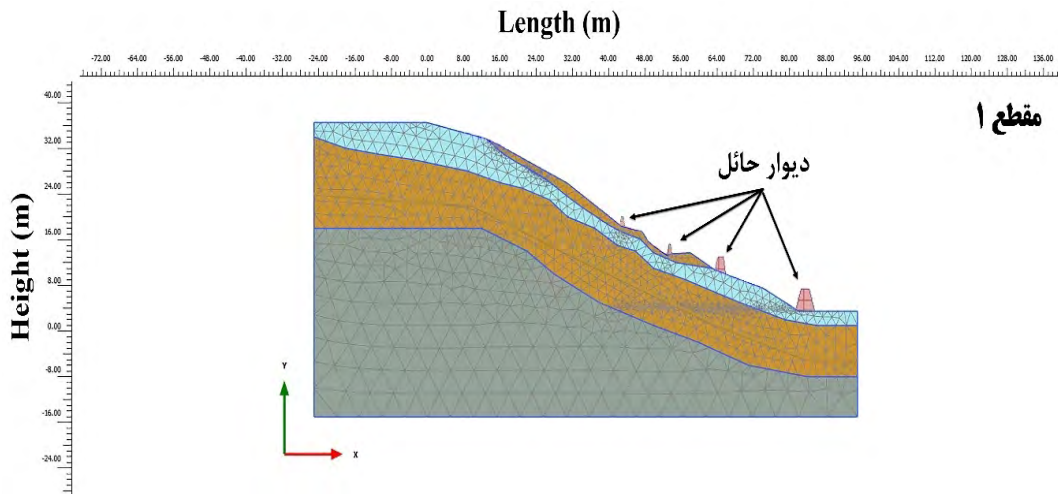


ب

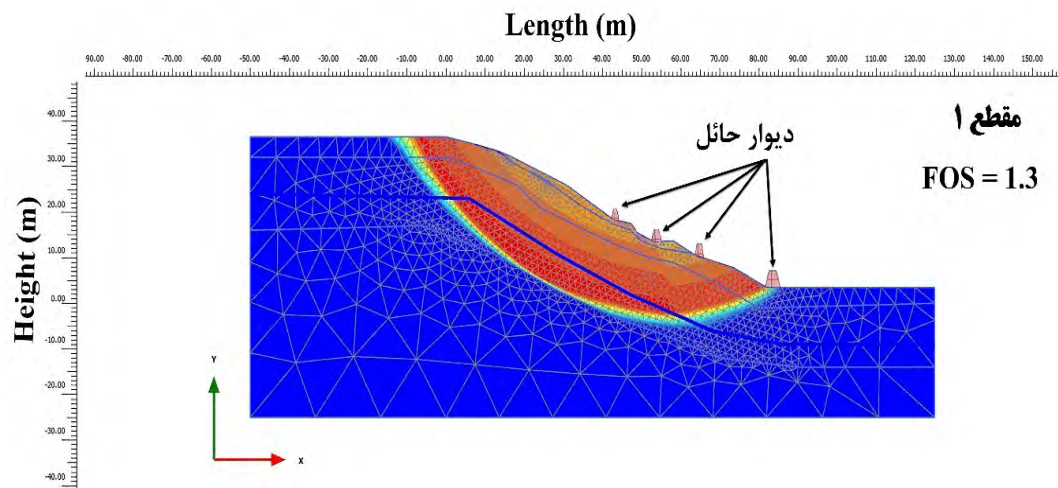


ج

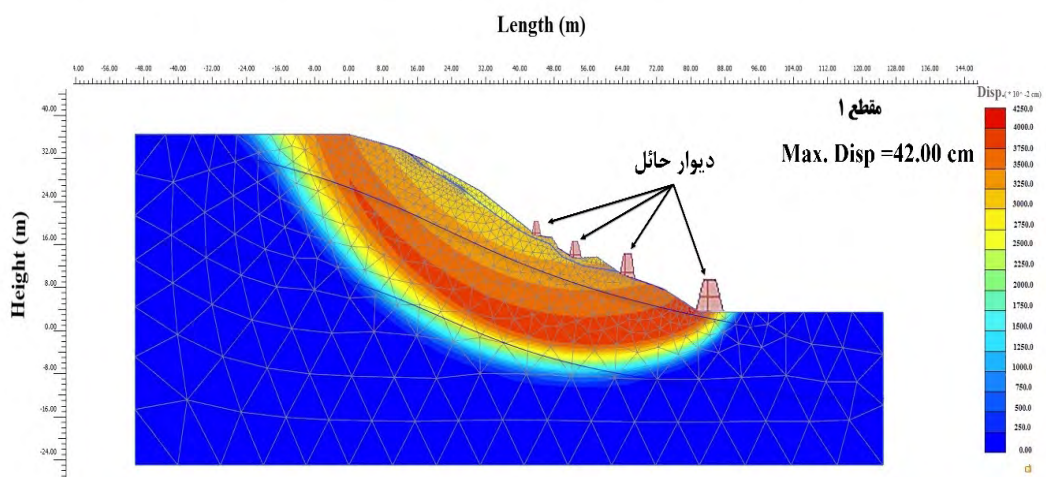
شکل ۱۶- عملکرد سیستم زهکشی پیشنهادی برای پایدارسازی روستای باریکان الف) موقعیت سیستم زهکش‌های زیرسطحی ب) جریان آب زیرزمینی به سمت زهکش‌ها در نتیجه عملکرد آن‌ها ج) جابه‌جایی کل دامنه



الف



ب



ج

شکل ۱۷- عملکرد دیوار حائل برای پایدارسازی روستای باریکان (الف) موقعیت دیوارهای حائل در سطح دامنه (ب) مقدار ضریب اطمینان دامنه با سازه نگهبان (دیوار حائل) (ج) مقدار جابه‌جایی منطقه بحرانی لغزش

۱۱۱  
شماره ۲۸  
زمستان ۱۴۰۲  
فصلنامه علمی  
و پژوهشی



تحلیل سازوکار زمین لغزش روستای باریکان شهرستان طالقان / پوریا حیدریان، علی‌اکبر سرمدی سینی



ایجادشده در محل تماس سنگ‌بستر و لایه‌های خاک بالای آن است بنابراین استفاده از سازه دیوار حائل برای افزایش ضریب اطمینان دامنه در شرایطی که سطح لغزش عمیق است مؤثر نیست و می‌تواند تأثیر معکوس داشته باشد چراکه باعث افزایش وزن توده لغزشی می‌شود.

بنابراین استفاده از این روش برای پایدارسازی زمین لغزش‌های سطحی توصیه می‌شود. خاطرنشان می‌شود که نتایج این مطالعه بر اساس مفروضات مدل‌سازی عددی (مانند مدل خاک استفاده‌شده، عدم قطعیت در مورد پراکنندگی لایه‌های خاک و پارامترهای بارندگی) است که در نظر گرفتن این مفروضات می‌تواند در آینده بینش خوبی در مورد توسعه زمین لغزش‌های ناشی از بارندگی ایجاد شود.

## ۵- نتیجه‌گیری

مقاله حال حاضر نتایج اولیه بررسی‌های میدانی و شبیه‌سازی عددی زمین لغزش بزرگ باریکان در شهرستان طالقان استان البرز را ارائه می‌کند که در نتیجه نامناسب بودن بستر و نرخ بارش‌های جوی در بازه‌های زمانی مختلف رخ داده است به طوری که تکرار زمین لغزش در زمان‌های مختلف باعث ایجاد مشکلات بسیار جدی برای ساکنین روستا شده است به طوری که تعداد قابل توجهی از ساختمان‌های روستا تخریب یا نزدیک به تخریب شده‌اند.

بررسی‌های میدانی نشان می‌دهند که پتانسیل وقوع لغزش در منطقه مورد مطالعه بالا است. دو فاکتور بسیار مهم باعث ایجاد زمین لغزش در روستای باریکان شده است: (۱) قرارگیری بستر روستا بر روی مصالح نابرجا ناشی از زمین لغزش قدیمی که در ابعاد وسیع در منطقه رخ داده است (۲) بارندگی سنگین رخ داده در بازه زمانی ۲ ماه (اسفند و فروردین‌ماه). داده‌های بارندگی در اسفند و فروردین‌ماه (سال ۱۳۹۷-

۱۳۹۸) نشان می‌دهد که شدت بارندگی حدود ۵ برابر مقدار بلندمدت آن بوده است و شدت بارندگی در آن بازه زمانی حدود ۲/۵ برابر آستانه بارندگی برای وقوع زمین لغزش است.

نتایج مطالعات زیرسطحی نشان می‌دهد که سنگ‌بستر در عمق نسبتاً زیادی قرار دارد و لایه‌های شن رس دار (GC) و رسی (CL) به‌عنوان لایه‌های خاکی موجود در منطقه دارای ضخامت قابل توجهی هستند که قرارگیری لایه رسی مابین لایه‌های شنی سبب تسهیل در ایجاد سطوح لغزش با عمق متوسط در دامنه می‌شود که پروفیل‌های مقاومت الکتریکی به‌دست‌آمده از مطالعات ژئوفیزیک و نتایج تحلیل‌های عددی هم بیانگر آن است.

نتایج مدل‌سازی عددی مقاطع در نظر گرفته‌شده برای روستای باریکان نشان می‌دهد که مقدار ضریب اطمینان بعد از بارندگی‌های رخ داده به‌طور میانگین حدود ۲۰ درصد کاهش یافته است. مقدار ضریب اطمینان برای مقطع بحرانی روستا از ۱/۸ به ۱/۱۸ کاهش پیدا می‌کند و مقدار جابه‌جایی دامنه بعد از بارندگی حدود ۴۲ برابر افزایش می‌یابد که همین امر باعث می‌شود سازه‌های موجود در آن منطقه به حد تخریب نزدیک شوند. استفاده از روش‌های مدیریت آب باعث افزایش ۳۱ درصدی ضریب اطمینان و کاهش ۵۰ درصدی جابه‌جایی کل دامنه می‌شود. مقایسه روش‌های پایدارسازی پیشنهادی نشان می‌دهد که استفاده از روش‌های مدیریتی منابع آب نسبت به روش‌های سازه‌ای پیشنهادی (دیوار حائل) می‌تواند مقدار جابه‌جایی را حدود ۵۰ درصد کاهش دهد و مقدار آن از ۴۲ سانتی‌متر به ۲۱ سانتی‌متر در منطقه بحرانی لغزشی کاهش دهد. نتایج این مطالعه می‌تواند بینشی از تأثیرات تغییر اقلیم در ایران برای طراحی‌های ژئوسیستم آینده، پیش‌بینی مخاطرات زمین‌شناسی و انتخاب راهبردهای

<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.02.011>

9. Kwong, A. K. L., Wang, M., Lee, C. F., & Law, K. T. (2004). A review of landslide problems and mitigation measures in Chongqing and Hong Kong: Similarities and differences. *Engineering Geology*, 76(1-2), 27-39.

<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2004.06.004>

10. Anbarasu, K., Sengupta, A., Gupta, S., & Sharma, S. P. (2010). Mechanism of activation of the Lanta Khola landslide in Sikkim Himalayas. *Landslides*, 7(2), 135-147. <https://doi.org/10.1007/s10346-009-0193-0>.

11. Tang, C., Zhu, J., Qi, X., & Ding, J. (2011). Landslides induced by the Wenchuan earthquake and the subsequent strong rainfall event: A case study in the Beichuan area of China. *Engineering Geology*, 122(1-2), 22-33. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2011.03.013>.

12. Zhang, A., Zhang, P., Dai, Z., Huang, B., Zhang, C., Wang, L., & Jiang, X. (2022). Failure mechanism of the Simiqiao landslide under rainfall and slope cutting. *Arabian Journal of Geosciences*, 15. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-10698-y>.

13. Chien-Yuan, C., Tien-Chien, C., Fan-Chieh, Y., & Sheng-Chi, L. (2005). Analysis of time-varying rainfall infiltration induced landslide. *Environmental Geology*, 48(4-5), 466-479. <https://doi.org/10.1007/s00254-005-1289-z>.

14. Di, B., Stamatopoulos, C. A., Stamatopoulos, A. C., Liu, E., & Balla, L. (2021). Proposal, application and partial validation of a simplified expression evaluating the stability of sandy slopes under rainfall conditions. *Geomorphology*, 395, 107966. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107966>.

15. Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M., & Stark, C. P. (2008). The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows: An update. *Landslides*, 5(1), 3-17. <https://doi.org/10.1007/s10346-007-0112-1>.

16. Li, S., Liu, R., Zhang, Q., & Zhang, X. (2016). Protection against water or mud inrush in tunnels by grouting: A review. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 8(5), 753-766. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2016.05.002>

17. Askarinejad, A., Laue, J., Zweidler, A., Iten, M., Bleiker, E., Buschor, H., & Springman, S. M. (2012). Physical modelling of rainfall induced landslides under controlled climatic conditions. *Eurofuge*, January 2017. <http://www.cces.ethz.ch/projects/hazri/tramm/>

18. Paswan, A. P., & Shrivastava, A. K. (2022). Modelling of rainfall-induced landslide: a threshold-based approach. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(8), 795. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-10024-6>.

19. Rivera-Hernandez, X. A., Ellithy, G. S., & Vahedifard, F. (2019). Integrating Field Monitoring and Numerical Modeling to Evaluate Performance of a Levee under Climatic and Tidal Variations. *Journal of*

مناسب کاهش خطر زمین لغزش ناشی از بارندگی ارائه دهد.

## ۶- تشکر و قدردانی:

تحقیق حال حاضر با حمایت مالی پژوهشکده سوانح طبیعی در طرح پژوهشی شماره ۱۱۸۰۰/۳۱ تهیه شده است و نویسندگان از همکاران پژوهشکده سوانح طبیعی برای همکاری و مساعدت تشکر و قدردانی می نمایند.

## ۷- منابع

1. Yalcin, A. (2011). A geotechnical study on the landslides in the Trabzon Province, NE, Turkey. *Applied Clay Science*, 52(1-2), 11-19. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2011.01.015>.

2. Di, B., Stamatopoulos (2019). Recent rainfall-induced rapid and long-traveling landslide on 17 May 2016 in Aranayaka, Kagelle District, Sri Lanka. *Landslides*, 16(1), 155-164. <https://doi.org/10.1007/10346-018-1089-7>.

3. Vasseghi, A., Haghshenas, E., Soroushian, A., & Rakhshandeh, M. (2021). Failure analysis of a natural gas pipeline subjected to landslide. *Engineering Failure Analysis*, 119, 105009. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.105009>.

4. Zêzere, J. L., Ferreira, A. B., & Rodrigues, M. L. (1999). Landslides in the North of Lisbon Region (Portugal): Conditioning and triggering factors. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, 24(10), 925-934. [https://doi.org/10.1016/S1464-1895\(99\)00137-4](https://doi.org/10.1016/S1464-1895(99)00137-4).

5. Cascini, L. (2008). Applicability of landslide susceptibility and hazard zoning at different scales. *Engineering Geology*, 102(3-4), 164-177. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.016>

6. Gullà, G., Antronico, L., Iaquina, P., & Terranova, O. (2008). Susceptibility and triggering scenarios at a regional scale for shallow landslides. *Geomorphology*, 99(1-4), 39-58. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.10.005>.

7. Dai, F. C., Lee, C. F., & Ngai, Y. Y. (2002). Landslide risk assessment and management: An overview. *Engineering Geology*, 64(1), 65-87. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(01\)00093-X](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(01)00093-X).

8. Yao, X., Tham, L. G., & Dai, F. C. (2008). Landslide susceptibility mapping based on Support Vector Machine: A case study on natural slopes of Hong Kong, China. *Geomorphology*, 101(4), 572-582.



techniques. *Landslides*, 16(1), 91–103. <https://doi.org/10.1007/s10346-018-1078-x>.

31. Javdanian, H., Zarei, M., & Shams, G. (2023). Estimating seismic slope displacements of embankment dams using statistical analysis and numerical modeling. *Modeling Earth Systems and Environment*, 9(1), 389–396. <https://doi.org/10.1007/s40808-022-01505-4>

32. Highland, L. M., & Bobrowsky, P. (2008). *The landslide Handbook - A guide to understanding landslides*. US Geological Survey Circular, 1325, 1–147.

33. Palmisano, F., Vitone, C., & Cotecchia, F. (2018). Assessment of Landslide Damage to Buildings at the Urban Scale. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 32(4), 1–13. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cf.1943-5509.0001201](https://doi.org/10.1061/(asce)cf.1943-5509.0001201).

34. Alimohammadlou, Y., Najafi, A., & Gokceoglu, C. (2014). Estimation of rainfall-induced landslides using ANN and fuzzy clustering methods: A case study in Saeen Slope, Azerbaijan province, Iran. *Catena*, 120, 149–162. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.04.009>.

35. Jia, G., Tang, Q., & Xu, X. (2020). Evaluating the performances of satellite-based rainfall data for global rainfall-induced landslide warnings. *Landslides*, 17(2), 283–299. <https://doi.org/10.1007/s10346-019-01277-6>.

36. Guo, C., Zhang, Y., Li, X., Ren, S., Yang, Z., Wu, R., & Jin, J. (2020). Reactivation of giant Jiangdingya ancient landslide in Zhouqu County, Gansu Province, China. *Landslides*, 17(1), 179–190. <https://doi.org/10.1007/s10346-019-01266-9>.

37. Zygouri, V., & Koukouvelas, I. K. (2019). Landslides and natural dams in the Krathis River, north Peloponnese, Greece. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78(1), 207–222. <https://doi.org/10.1007/s10064-017-1225-y>.

38. Naidu, S., Sajinkumar, K. S., Oommen, T., Anuja, V. J., Samuel, R. A., & Muraleedharan, C. (2018). Early warning system for shallow landslides using rainfall threshold and slope stability analysis. *Geoscience Frontiers*, 9(6), 1871–1882. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2017.10.008>.

39. Hunt, R. E. (1986). *Geotechnical Engineering Analysis and Evaluation*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:106655993>.



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

*Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 145(10), 1–14. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0002134](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0002134).

20. Zhao, N., Hu, B., Yi, Q., Yao, W., & Ma, C. (2017). The coupling effect of rainfall and reservoir water level decline on the Baijiabao landslide in the three gorges reservoir area, China. *Geofluids*, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/3724867>.

21. Vahedifard, F., Tehrani, F. S., Galavi, V., Ragno, E., & AghaKouchak, A. (2017). Resilience of MSE Walls with Marginal Backfill under a Changing Climate: Quantitative Assessment for Extreme Precipitation Events. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 143(9), 1–14. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0001743](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0001743).

22. Lashgari, A., & Haddad, A. (2023). Failure mechanism of a destructive landslide in Hosein Abad Kalpush Village, Semnan, Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 16(4), 1–16. <https://doi.org/10.1007/s12517-023-11376-3>.

23. Alimohammadi, H., Amirmojahedi, M., & Tahat, J. N. (2023). A Case History of Application of Deep Compaction Method with Comparison to Different Ground Improvement Techniques. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 10(4), 543–568. <https://doi.org/10.1007/s40515-022-00229-3>

24. Loo, Y. Y., Billa, L., & Singh, A. (2015). Effect of climate change on seasonal monsoon in Asia and its impact on the variability of monsoon rainfall in Southeast Asia. *Geoscience Frontiers*, 6(6), 817–823. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gsf.2014.02.009>.

25. Vaghefi, S. A., Keykhai, M., Jahanbakhshi, F., Sheikholeslami, J., Ahmadi, A., Yang, H., & Abbaspour, K. C. (2019). The future of extreme climate in Iran. *Scientific Reports*, 9(1), 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-38071-8>.

۲۶ - پژوهشکده سوانح طبیعی، (۱۴۰۲)، مطالعات پایدارسازی روستای باریکان (شهرستان طالقان). زمستان ۱۴۰۲. تهران.

۲۷- امیر احمدی، ابوالقاسم؛ جمال آبادی، جواد؛ دانشفر، رفعت (۱۴۰۱). مدل سازی و پهنه بندی زمین لغزش های حوضه لتیان با استفاده از مقایسه آماری ۲ متغیره. دو فصلنامه مدیریت بحران، شماره ۲۱.

۲۸- ویس کرمی، علی؛ نوفرستی، حسین (۱۴۰۱). تحلیل و بررسی زمین لغزش پاهلت. دو فصلنامه مدیریت بحران، شماره ۲۱.

29. Jafarian, Y., Lashgari, A., & Haddad, A. (2019). Predictive model and probabilistic assessment of sliding displacement for regional scale seismic landslide hazard estimation in Iran. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 109(5), 1581–1593. <https://doi.org/10.1785/0120190004>.

30. Javdanian, H., & Pradhan, B. (2019). Assessment of earthquake-induced slope deformation of earth dams using soft computing

