Journal of Range & Watershed Management
https://jrwm.ut.ac.ir/

Volume 77 (4)
Online ISSN: 2423-7795

Landslide probability analysis using TRIGRS program (Case study: Chakrod Watershed, Gilan)

Mohammad Reza Mehrpouya*

Environmental Hazards Group, Natural Disasters Research Institute, Tehran, Iran.
E-mail: mehrpouya@ndri.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received: 27 May. 2024
Revised: 26 July. 2024
Accepted: 28 July. 2024
Published online: 21 Dec. 2024

Keywords:
TRIGRS program,
Landslide prediction,
Shallow landslide,
Safety factor.

Abstract

Landslides are one of the most destructive types of mass movements, and this research investigates the probability of their occurrence in the Chakrod watershed of Siahkal City, Gilan Province, using the TRIGRS program. This program can assess areas prone to shallow landslides caused by rainfall and evaluate the effect of rainfall and runoff on the stability of the terrain. In this study, the required maps for the program were prepared, including the digital elevation model, topographic slope, surface runoff flow direction, engineering geological characteristics, soil type, soil thickness, depth of the groundwater level, and precipitation data. Next, in a geographic information system (GIS), the maps produced in raster form were converted into text files for use in the TRIGRS program. By running the program, the minimum stability safety factor, sliding depth, and pore water pressure at that depth were calculated for each cell and presented in a text file. This data was then converted into a raster map using GIS software. This spatial distribution map represents the minimum safety factor and landslide potential zoning for the studied basin. The results of this research showed that this program accurately predicted landslide-prone areas after infiltration modeling and runoff routing. These areas encompass 1,395.37 hectares, equivalent to 8.9% of the watershed area, particularly in parts of Zone 2, which consists of soils rich in shale and clay minerals, and Zone 3, which includes soils and sliding sediments on steep slopes with high soil thickness.

Cite this article: Mehrpouya, M.R. (2024). Landslide probability analysis using TRIGRS program (Case study: Chakrod Watershed, Gilan). *Journal of Range & Watershed Management*, 77 (4), 471-489. DOI: http//doi.org/10.22059/jrwm.2024.377135.1767

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press

نشریه مرتع و آبخیزداری

دوره ۷۷ (۴)
شاپا الکترونیکی: ۲۴۲۳-۷۷۹۵

تحلیل استعداد وقوع زمین‌لغزش با استفاده از برنامه تریگرز (مطالعه موردی: حوزه آبخیز چاکرود گیلان)

محمدرضا مهرپویا[1*]

گروه مخاطرات زیست‌محیطی، پژوهشکده سوانح طبیعی، تهران، ایران
رایانامه: mehrpouya@ndri.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۰۷
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۵/۰۶
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳ /۰۵/۰۸
تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۱۰/۰۱

کلیدواژه‌ها:
برنامه تریگرز،
پیش‌بینی زمین‌لغزش،
زمین‌لغزش کم‌عمق،
ضریب ایمنی.

چکیده

زمین‌لغزش‌ها یکی از مخرب‌ترین نوع حرکات دامنه‌ای هستند که در این پژوهش به بررسی استعداد وقوع آن‌ها در حوزه آبخیز چاکرود شهرستان سیاهکل استان گیلان با استفاده از برنامه تریگرز (TRIGRS) پرداخته شده است. این برنامه قادر است مناطق مستعد بروز زمین‌لغزش‌های کم‌عمق ناشی از بارندگی و اثر بارندگی و رواناب بر پایداری دامنه را مورد بررسی قرار دهد. در پژوهش حاضر، ابتدا نقشه‌های موردنیاز برنامه، شامل مدل ارتفاع رقومی، شیب توپوگرافی، جهت جریان رواناب سطحی، خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی و تیپ خاک، ضخامت خاک، عمق سطح آب زیرزمینی و داده‌های بارش تهیه شد. در ادامه در سیستم اطلاعات جغرافیایی نقشه‌های تولید شده به‌صورت رستر، به فایل‌های متنی مورد استفاده در برنامه تریگرز تبدیل شده است. با اجرای برنامه، برای هر سلول حداقل ضریب ایمنی پایداری، عمق لغزش و فشار آب منفذی در آن عمق محاسبه شده و به‌صورت فایل متنی ارائه می‌گردد که مجدداً با استفاده از نرم‌افزار GIS این فایل متنی به نقشه رستری تبدیل می‌شود؛ این نقشه توزیع مکانی حداقل ضریب اطمینان و پهنه‌بندی پتانسیل وقوع زمین‌لغزش برای حوضه موردمطالعه می‌باشد. نتایج این تحقیق نشان داد که این برنامه با دقت بالایی مناطق مستعد وقوع زمین‌لغزش را پس از مدل‌سازی نفوذ و مسیریابی رواناب پیش‌بینی کرده است. این مناطق ۱۳۹۵/۳۷ هکتار معادل ۸/۹ درصد از مساحت حوزه آبخیز را شامل می‌شود و بر قسمت‌هایی از زون ۲، متشکل از خاک‌های با شیل زیاد و حاوی کانی‌های رسی فراوان و زون ۳ شامل خاک‌ها و رسوبات لغزشی که در دامنه‌های پرشیب و با ضخامت زیاد خاک است، منطبق می‌باشد.

استناد: مهرپویا؛ محمدرضا (۱۴۰۳). تحلیل استعداد وقوع زمین‌لغزش با استفاده از برنامه تریگرز (مطالعه موردی: حوزه آبخیز چاکرود گیلان). *نشریه مرتع و آبخیزداری*، ۷۷(۴)، ۴۸۹-۴۷۱.
DOI: http//doi.org/10.22059/jrwm.2024.377135.1767

ناشر : انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

۱. مقدمه

زمین‌لغزش‌ها در بسیاری از مناطق دنیا مخصوصاً کشورهای با تنوع لیتولوژیکی و ژئومورفولوژی کوهستانی از جمله ایران، از مهم‌ترین مخاطرات طبیعی به شمار می‌آیند؛ همچنین به‌عنوان یکی از فرآیندهای فعال، نقش مهمی در فرسایش و تحول چشم‌اندازهای طبیعی دارند (Goetz et al., 2011). عوامل مختلف داخلی و خارجی بر وقوع زمین‌لغزش‌ها مؤثر می‌باشد، از جمله عوامل داخلی می‌توان به ویژگی‌های خاک، شیب، مورفولوژی، پوشش گیاهی اشاره نمود. عوامل مؤثر خارجی از جمله متغیرهای اقلیمی و مکانی مانند بارش‌های شدید، زلزله و فعالیت‌های آتش‌فشانی نیز می‌توانند سبب تحریک بروز زمین‌لغزش گردند (Nahayo et al., 2019). زمین‌لغزش‌ها یکی از مخاطرات طبیعی جهان است که در حدود ۱۷ درصد این وقایع طبیعی را تشکیل داده است و با توجه به افزایش دست‌کاری انسان در طبیعت از جمله تغییر کاربری‌ها از جمله تغییر اراضی جنگلی به اراضی زراعی، شهرسازی، جاده‌سازی‌ها، معدن‌کاری و غیره و نیز به دلیل تغییرات طبیعی در جهان از جمله تغییرات اقلیمی، فرسایش، خشکسالی و... همچنان ادامه دارد (Ocakoglu et al., 2002). حسن‌زاده نفوتی (۲۰۰۰) در مطالعه‌ای در شلمارود استان گیلان به بررسی عوامل مؤثر در بروز زمین‌لغزش و پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در منطقه پرداخته است، بر اساس این مطالعه تغییر کاربری در اراضی جنگلی و تبدیل آن‌ها به اراضی زراعی دیم و اراضی چای مؤثرترین عامل در بروز زمین‌لغزش در این منطقه بوده است.

وقوع زمین‌لغزش‌ها به ویژه در مناطق شهری و مسکونی و نزدیک به سکونتگاه‌های انسانی سبب بروز خسارات مالی و جانی فراوان می‌گردد و به همین سبب امروزه مطالعه آن‌ها موردتوجه قرار گرفته است. روش‌های متعدد و متنوعی جهت بررسی زمین‌لغزش‌ها وجود دارد. یکی از جدیدترین روش‌های مورد استفاده، برنامه TRIGRS[1] است. این برنامه در بسیاری از نقاط جهان مورد استفاده قرار گرفته است. پارک[2] و همکاران (۲۰۱۳) جریان‌های واریزه‌ای را با استفاده از برنامه TRIGRS پیش‌بینی نموده و مسیرهای احتمالی جریان‌های واریزه‌ای را مورد بررسی قرار دادند، در این مطالعه حتی در بخش‌هایی که مشخصات مصالح و میزان فرسایش در دست نبود، نیز برنامه کارآمد بود. شیلیرو[3] و همکاران (۲۰۱۵) در شمال شرقی سیسیل با استفاده از این نرم‌افزار به بررسی میزان پایداری دامنه‌ها پرداخته و احتمال رخداد زمین‌لغزش‌های کم‌عمق را پیش‌بینی نمودند. بر اساس نتایج به دست آمده بارش‌های کوتاه‌مدت (بین ۱ تا ۳ ساعت) با دوره بازگشت کوتاه نیز می‌توانند باعث ناپایداری دامنه‌ها گردند. ویرا [4] و همکاران (۲۰۱۸) خطرات زمین‌لغزش‌های کم‌عمق را در منطقه سرا دو مار برزیل با استفاده از مدل‌های TRIGRS و SHALSTAB، مورد بررسی قرار دادند. بر اساس این پژوهش، هر دو مدل در پیش‌بینی مناطق مستعد وقوع زمین‌لغزش‌های سطحی از طریق مقایسه مناطق پیش‌بینی شده ناپایدار و مکان زمین‌لغزش‌های نقشه‌برداری شده و از طریق استفاده از شاخص پتانسیل زمین‌لغزش، کارآمد نشان داده شدند. آلویولی[5] و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از برنامه TRIGRS تأثیر اقلیم و به ویژه نوسانات شدت و مدت بارش را بر زمین‌لغزش‌ها بررسی نمودند.

علاوه بر این شیلیرو و همکاران (۲۰۲۱) در جنوب شرقی نروژ از این نرم‌افزار استفاده کرده و زمین‌لغزش‌های رخداده در منطقه را مورد پایش قرار داده و مشخص شد نرم‌افزار علاوه بر توانایی تشخیص زمین‌لغزش‌ها، می‌تواند اثر عوامل هیدرولوژیکی دیگر مانند ذوب برف را روی ناپایداری دامنه‌ها و بر روی زمین‌لغزش‌های رخداده قبلی مورد بررسی قرار دهد. مطالعات انجام شده توسط سیورلئو[6] و همکاران (۲۰۲۲) در کالابریای ایتالیا نشان داد می‌توان از عوامل فیزیکی و مکانیکی که در پژوهش پیشین برای خاک ارائه شده است به‌عنوان ورودی‌های برنامه استفاده نمود و بر اساس نتایج اولیه حاصل از برنامه، نقاط مناسب برای مطالعات دقیق‌تر محلی و نمونه‌برداری را مشخص نمود. سپس با توجه به نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی بر روی نمونه‌ها، خواص ژئوتکنیکی خاک به‌دقت تعیین شده و این

[1] Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope Stability Analysis
[2] Park
[3] Schiliro
[4] Vieira
[5] Alvioli
[6] Ciurleo

نتایج به‌عنوان داده‌های ورودی جدید به برنامه وارد شوند تا نتایجی با دقت بیشتر به دست آید.

در ایران نیز مطالعاتی با بهره‌گیری از نرم‌افزار TRIGRS انجام شده است. صادقی و همکاران (۲۰۱۴) از این برنامه در حوزه آبخیز نکارود مازندران به منظور پیش‌بینی وقوع زمین‌لغزش‌های سطحی استفاده نموده و براساس پژوهش صورت گرفته مشخص شده، این نرم‌افزار قابلیت پیش‌بینی زمان و مکان رخداد زمین‌لغزش را در منطقه داشته و می‌تواند گسترش فضایی تغییر خصوصیات منطقه همچون شیب، عمق خاک، عمق سطح ایستابی و نوع خاک را بر هم منطبق کرده و وقوع زمین‌لغزش را شبیه سازی کند. علاوه بر این مشخص شد که عواملی مانند نوع خاک و خصوصیات مکانیکی و هیدرولوژیکی آن نسبت به شدت و مدت بارش و مورفولوژی دامنه‌ها نقش موثرتری در ناپایداری شیب‌ها داشته است.

عبدی‌نژاد و همکاران (۲۰۲۳) نیز با استفاده از نرم‌افزار TRIGRS به بررسی حوزه آبخیز بابل رود مازندران از نظر پتانسیل رخداد زمین‌لغزش‌های کم عمق و جریان‌های واریزه‌ای پرداخته‌اند. از بررسی نتایج به دست آمده از نرم‌افزار TRIGRS و مشاهدات صحرایی در این مطالعه مشخص شد که اغلب زمین لغزش‌ها و جریان‌های واریزه‌ای و گِلی در خاک‌هایی اتفاق افتاده‌اند که بر روی سنگ بستر با ترکیب رسی مانند شیل و مارن قرار دارند، بنابراین همخوانی خوبی میان نقشه‌های تهیه شده و مشاهدات و بررسی‌های صحرایی وجود دارد. براین اساس در مناطق مرتفع و پرشیب حوضه که از نظر لیتولوژی از سنگ‌های غنی از کانی‌های رسی تشکیل شده‌اند، احتمال رخداد زمین‌لغزش‌های کم عمق براثر بارندگی بالا می‌باشد که با واقعیت منطقه و زمین‌لغزش‌های رخ داده در حوضه همخوانی دارد. علاوه بر این در این پژوهش به بررسی تغییرات ضریب ایمنی دامنه‌ها بعد از ۶، ۱۲ و ۱۸ ساعت از شروع بارندگی پرداخته شد و مشخص شد، با گذشت زمان از آغاز بارندگی و با افزایش شدت آن، میزان ضریب ایمنی در برخی سلول‌های شبکه مورد مطالعه کاهش می‌یابد و این باعث شده است که این سلول‌ها ناپایدار شده یا به حالت ناپایدار نزدیکتر شوند. بر این اساس و با توجه به کارآیی این برنامه در پیش‌بینی زمان و مکان بروز زمین‌لغزش‌های سطحی ناشی از بارندگی، در پژوهش حاضر این برنامه مورد استفاده قرار گرفته است.

استان گیلان نیز به دلیل برخورداری از شرایط ویژه زمین‌شناسی، ژئومورفولوژی، لرزه‌خیزی، نزولات جوی زیاد و شرایط توپوگرافی از جمله استان‌هایی است که مستعد وقوع زمین‌لغزش در برخی از مناطق آن به ویژه در جنوب و محدوده‌های کوهستانی آن است. این مناطق به دلیل اهمیت زیاد از نظر سکونتگاهی و تراکم جمعیت انسانی، تنوع موجودات جانوری و پوشش گیاهی متراکم و خدمات متنوع بوم‌سازگان می‌بایستی بیش از پیش موردتوجه قرار گیرد. در نتیجه ضرورت دارد نسبت به شناسایی مناطق مستعد لغزش و برنامه‌ریزی جهت مدیریت زمین‌لغزش به منظور کاهش خسارات جانبی و مستقیم آن اقدام شود.

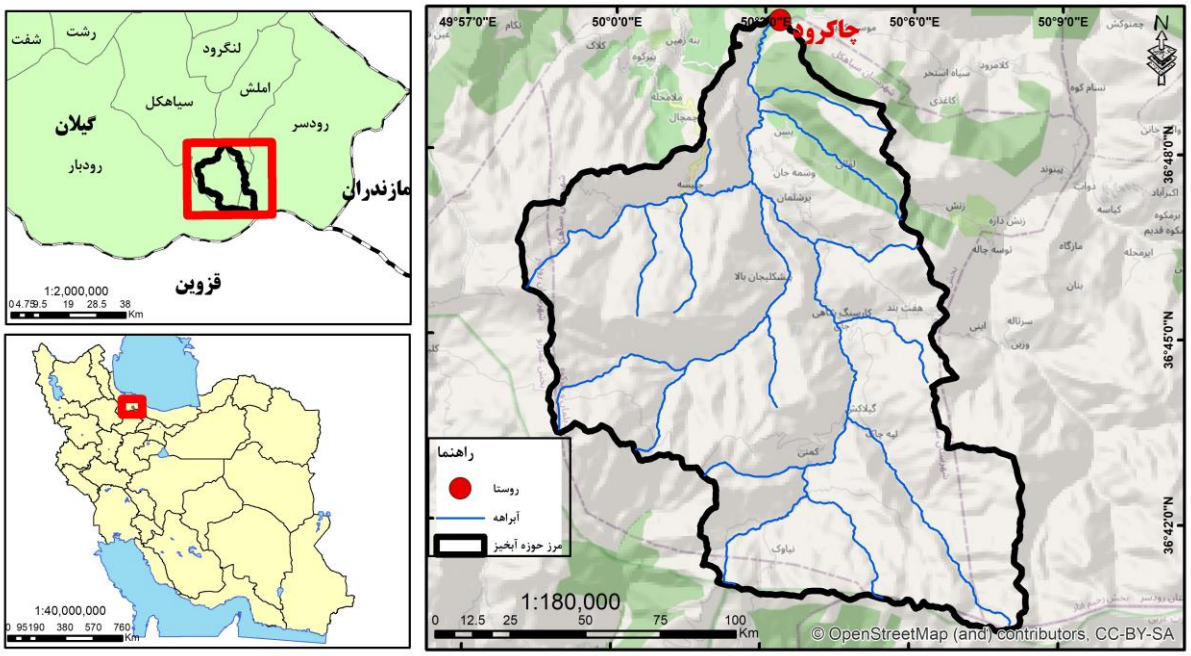
با توجه به شرایط جغرافیایی و اقلیمی حوزه آبخیز چاکرود، از جمله بالا بودن میزان بارندگی، وجود زمین‌لغزش و بالا بودن میزان شیب در بخش‌های وسیعی از منطقه، این حوزه آبخیز از مناطق مستعد وقوع زمین‌لغزش به شمار می‌روند. به همین دلیل با توجه به اهمیت پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش، در پژوهش حاضر سعی بر آن شده است تا با استفاده از مدل TRIGRS نقشه مناطق دارای پتانسیل خطر زمین‌لغزش زیاد در حوزه آبخیز مورد مطالعه بر اساس نفوذ بارندگی در خاک و تأثیر بارندگی بر پایداری دامنه، تهیه گردد.

۲. موارد و روش‌ها

۲-۱. معرفی حوزه آبخیز موردمطالعه

حوزه آبخیز چاکرود با مساحت حدود ۱۵۶۹۷ هکتار در جنوب شهرستان سیاهکل و در استان گیلان، در طول جغرافیایی ″۲۲ ´۵۸ °۴۹۰ تا ″۱۴ ´۸ °۵۰ شرقی و عرض جغرافیایی ″۳۵ ´۴۰ °۳۶ تا ″۱۲ ´۵۰ °۳۶ شمالی واقع شده است. طبق تقسیم‌بندی تماب، این حوضه بخشی از حوزه آبخیز درجه ۱ دریای خزر و در زیرحوضه پل رود با کد شماره ۱۴۱۵ محسوب می‌شود. حوزه آبخیز چاکرود منطقه‌ای کوهستانی است که بیش از ۹۹ درصد مساحت آن را کوهستان‌هایی با شیب زیاد تشکیل داده است. متوسط شیب توپوگرافی حدود ۲۵ درجه (۴۵ درصد) و حداقل و حداکثر ارتفاع حوضه به ترتیب ۱۰۱۶ و ۳۰۰۵ متر از سطح دریا می‌باشد. تنها بخش‌های کوچکی از شمال حوضه

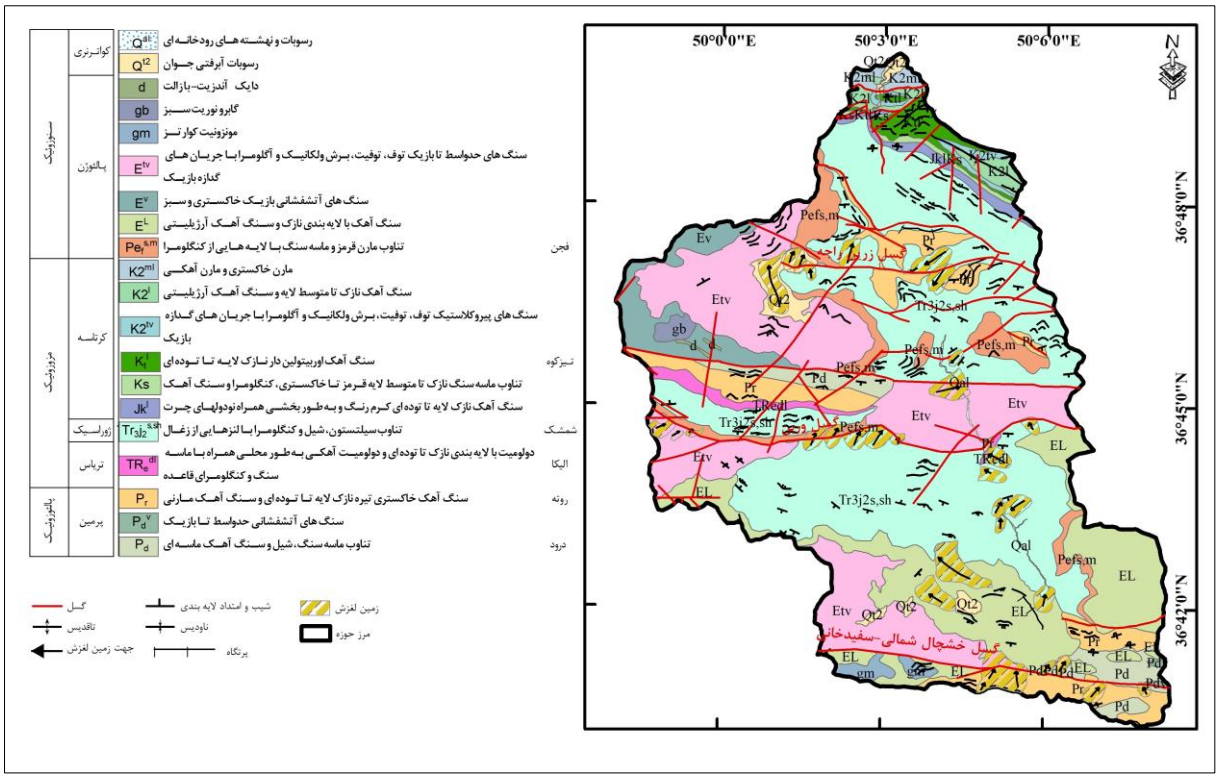
دشت‌های کوچکی را تشکیل داده است. اقلیم این منطقه بر اساس روش آمبرژه مرطوب سرد است. میزان ریزش‌های جوی سالانهٔ حوضه، به طور متوسط ۵۰۰ میلی‌متر می‌باشد. دسترسی به این حوضه پس از پیمایش حدود ۶۰ کیلومتر به سمت جنوب شرقی شهرستان سیاهکل از طریق جاده سیاهکل – دیلمان میسر می‌باشد. نام‌گذاری این حوضه نیز بر اساس قرارگیری روستای چاکرود در شمال حوزه آبخیز و در مجاورت خروجی آن صورت گرفته است (شکل ۱).



شکل ۱. موقعیت حوزه آبخیز چاکرود در استان گیلان و ایران

۲–۲. وضعیت زمین‌شناسی

حوزه آبخیز موردمطالعه از لحاظ زمین‌شناسی ساختاری با توجه به تقسیم‌بندی پهنه‌های ساختاری – رسوبی ایران، در پهنه ساختاری البرز غربی قرار دارد. تشکیلات و واحدهای موجود در حوضه موردمطالعه، عمدتاً شامل سنگ‌های رسوبی و آتشفشانی و نهشته‌های رسوبی متعلق به پالئوزوئیک تا کواترنری است. قدیمی‌ترین واحد شامل تناوب ماسه‌سنگ، شیل و سنگ‌آهک ماسه‌ای سازند درود است و در جنوب شرق و در نقاطی از مرکز حوضه قابل مشاهده است. جوان‌ترین واحدهای زمین‌شناسی موجود در حوضه نیز نهشته‌های آبرفتی کواترنری می‌باشد. شکل ۲ نقشه زمین‌شناسی حوضه را نشان می‌دهد. رسوبات آبرفتی عهد حاضر دارای ضخامت قابل توجهی از خاک بوده و واحدهای سنگی حوضه، از سنگ‌های رسوبی و آذرین تشکیل شده است و تحت‌تأثیر فرایندهای هوازدگی و فرسایش و بر اساس عوامل مؤثر از جمله نوع سنگ‌شناسی، میزان فرسایش رخ داده، شیب و پوشش گیاهی موجود بر روی دامنه‌ها، ضخامت‌های متفاوتی از خاک به‌صورت برجا بر روی این واحدها تشکیل شده است. در واحدهای با گسترش سنگ‌های نامقاوم و ضعیف مانند شیل و مارن در سازندهایی نظیر شمشک ضخامت خاک قابل توجه است و در واحدهای با سنگ‌های مقاوم مانند سنگ‌آهک در سازندهای پرمین یا تیزکوه، خاک قابل ملاحظه‌ای بر روی آن‌ها تشکیل نشده است (شکل ۳). به طور طبیعی خاک‌های تشکیل شده بر روی هر یک از واحدهای سنگی و همچنین خاک‌های نابرجا در رسوبات آبرفتی دارای خواص ژئوتکنیکی متفاوتی هستند و لذا انواع مختلفی از خاک‌ها در حوضه مورد مطالعه قابل مشاهده است.



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی حوزه آبخیز چاکرود

شکل ۳. الف) تصویر عدم تشکیل خاک بر روی سنگ‌های مقاوم ب) تصویر ضخامت قابل توجه خاک بر روی سنگ‌های ضعیف و هوازده

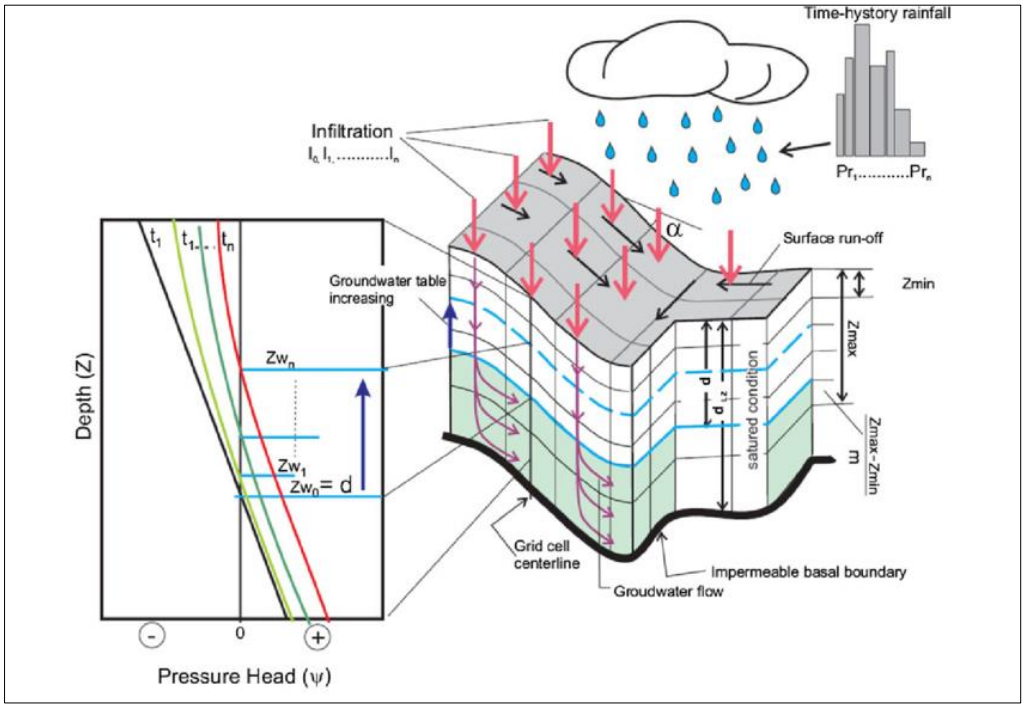
۲-۳. معرفی برنامه TRIGRS

در این پژوهش از برنامه کاربردی TRIGRS که توسط سازمان زمین‌شناسی آمریکا در سال ۲۰۰۲ ارائه شده است، به منظور پیش‌بینی وقوع زمین‌لغزش در حوزه آبخیز چاکرود استفاده شده است. این برنامه جهت تحلیل پایداری دامنه در مقیاس ناحیه‌ای قابل استفاده است

و به زبان فرترن و توسط باوم[1] و همکاران (۲۰۰۲ و ۲۰۰۸) نوشته شده است و در سال‌های اخیر در کشورهای مختلف جهت تجزیه و تحلیل زمین‌لغزش‌ها مورد استفاده قرار گرفته است (Baum et al., 2010, Liao et al., 2011, Park et al., 2013, Viet et al., 2017).

برنامه TRIGRS به اختصار، تحلیل نفوذ باران در خاک و پایداری شیب، مبتنی بر شبکه و در مقیاس ناحیه‌ای اطلاق می‌شود و امکان وقوع زمین لغزش‌های کم‌عمق بر اثر وقوع بارندگی را مورد بررسی قرار می‌دهد (Baum et. Al., 2002). این برنامه مدل‌هایی را برای ۱- پایداری شیب ۲- نفوذ آب باران و جریان زیرسطحی آب و ۳- مسیریابی رواناب را برای محاسبه اثر آن‌ها بر پایداری شیب‌ها را در مقیاس ناحیه‌ای ترکیب می‌کند (شکل ۴).

برنامه TRIGRS یک مدل هیدرولوژیکی و یک مدل پایداری را برای پیش‌بینی زمین لغزش‌های کم‌عمق ناشی از رویدادهای بارندگی ترکیب می‌کند که در نهایت با محاسبه تغییرات فشار منفذی، اثرات آن را بر ضریب ایمنی[2] در اعماق مختلف مشخص می‌کند. این برنامه تغییرات فشار آب منفذی را به‌صورت لحظه‌ای از زمان شروع بارندگی می‌تواند محاسبه کند و بر اساس تغییرات فشار منفذی، تغییرات ضریب ایمنی را بر روی دامنه و در سطوح مختلف خاک و در زمان‌های مختلف محاسبه می‌کند



شکل ۴. اجزای مدل تریگرز در تحلیل پایداری شیب (Grelle et al., 2014)

نقش بارندگی در وقوع زمین‌لغزش بسیار زیاد است، با وقوع بارندگی شرایط دامنه‌ها از لحاظ پایداری دچار تغییر می‌شود. بارندگی در داخل زمین نفوذ کرده و سبب تغییراتی در خصوصیات خاک می‌شود. وجود فشار موئینگی در خاک‌های غیراشباع می‌تواند تأثیر زیادی بر پایداری شیب داشته باشد. نیروهای موئینگی ذرات ریزدانه را در کنار هم نگه می‌دارد و می‌تواند چسبندگی بیشتری برای خاک ایجاد کند. چسبندگی ایجاد شده توسط نیروهای موئینگی با افزایش اشباع خاک کاهش می‌یابد. با رسیدن آب به زون غیراشباع خاک، مکش کالبدی و در نتیجه مقاومت برشی خاک کاهش می‌یابد و با کاهش مقاومت برشی خاک به اندازه معینی، گسیختگی شیب رخ داده و ناپایداری

[1] Baum
[2] Safety Factor

اتفاق خواهد داد (Freeze and Cherry, 1979).

۲-۴. داده‌های مورد نیاز برنامه

جهت استفاده از برنامه تریگرز، ابتدا بایستی اطلاعات و داده‌های ورودی لازم از حوضه مورد مطالعه تهیه گردد. از مهم‌ترین پارامترهای موردنیاز در این برنامه مدل ارتفاع رقومی (DEM) حوضه (ابعاد ۱۰*۱۰ متر)، شیب توپوگرافی، جهت جریان و نحوه توزیع رواناب‌های سطحی، ضخامت خاک، عمق سطح آب زیرزمینی، مشخصات خاک‌های منطقه شامل میزان چسبندگی، مقدار زاویه اصطکاک داخلی، ضریب هدایت هیدرولیکی، وزن مخصوص خاک، ضریب پخشیدگی، درصد رطوبت اشباع، درصد رطوبت باقیمانده و ضریب α می‌باشد علاوه بر این عوامل، میزان بارش، تعداد دوره‌های بارش، مدت زمان بارش نیز از جمله اطلاعات موردنیاز این برنامه می‌باشد (جدول ۱). برخی از این پارامترها مانند خصوصیات ژئوتکنیکی و هیدروژئولوژیکی مصالح تشکیل‌دهنده دامنه شامل دانسیته، چسبندگی، زاویه اصطکاک، محتوای آب، هدایت هیدرولیکی اشباع و همچنین خصوصیات هندسی دامنه شامل شیب دامنه و صفحه لغزش و عمق سطح گسیختگی در طول زمان ثابت هستند و برخی نیز وابسته به زمان و در طول آن متغیر می‌باشند (Liao et al., 2011). اساسی‌ترین پارامتر متغیر فشار آب منفذی است که در بخش غیراشباع خاک تابعی از نوسانات درصد رطوبت و در بخش اشباع وابسته به نوسانات تراز سطح آب زیرزمینی است (Freeze & Cherry., 1979).

جدول ۱. داده‌های ورودی موردنیاز برنامه تریگرز (Liao et al., 2011)

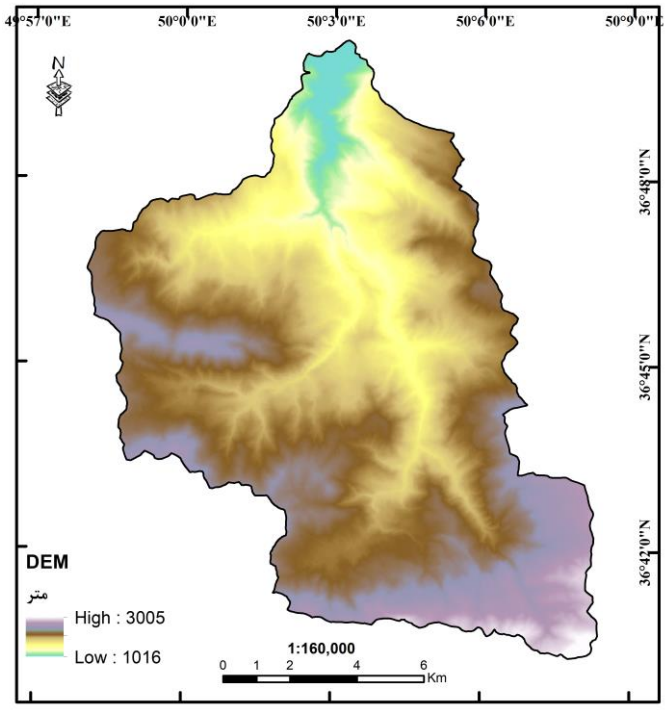
پارامترهای ثابت			پارامترهای متغیر
زمین‌ریخت‌شناسی	زمین‌شناسی و ژئوتکنیک	هیدروژئولوژیکی	بارش
مدل ارتفاع رقومی (DEM) شیب توپوگرافی جهت جریان رواناب	عمق خاک (Zmax) عمق سطح آب زیرزمینی چسبندگی (C) زاویه اصطکاک داخلی (Φ) وزن مخصوص خاک (γs)	نفوذپذیری محدوده اشباع (Ks) رطوبت حجمی اشباع (θs) رطوبت حجمی باقیمانده (θr) نرخ اولیه نفوذ (IZ) عکس ارتفاع محدوده موئینه (α) ضریب پخشیدگی (D)	شدت بارش مدت بارش

۲-۴-۱. مدل ارتفاع رقومی (DEM)

مدل ارتفاع رقومی مهم‌ترین داده موردنیاز است که در واقع به‌عنوان نقشه مبنا برای سایر نقشه‌ها نیز در نظر گرفته می‌شود. در نتیجه این پارامتر بایستی با دقت و کیفیت زیادی تهیه گردد؛ لذا در این پژوهش به منظور تهیه مدل ارتفاع رقومی حوضه، با استفاده از منحنی میزان موجود در نقشه‌های توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ و نقاط ارتفاعی منطقه، در نرم‌افزار Arc Gis10.8 اقدام شد و این نقشه از پیکسل‌هایی با ابعاد ۱۰*۱۰ متر تهیه شد. شکل ۵ نقشه مدل ارتفاع رقومی (DEM) حوضه را نشان می‌دهد. بیشترین ارتفاع در حوضه موردمطالعه ۳۰۰۵ متر در جنوب شرق آن و کمترین ارتفاع نیز حدود ۱۰۱۶ متر از سطح آب دریای آزاد در شمال حوضه می‌باشد.

۲-۴-۲. شیب حوزه آبخیز

از دیگر پارامترهای موردنیاز، نقشه شیب توپوگرافی منطقه است که بعد از تهیه مدل ارتفاع رقومی حوضه، با استفاده از نرم‌افزار GIS، بر حسب درجه برای هر یک از سلول‌ها تهیه می‌گردد. شکل ۷ نقشه شیب حوضه را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در نقشه شیب منطقه مشاهده می‌شود، بیشترین مقدار شیب در حوزه آبخیز چاکرود ۷۵ درجه و کمترین نیز صفر می‌باشد و بیشترین مساحت متعلق به بازه بین ۲۵ تا ۳۵ درجه است (جدول ۲).



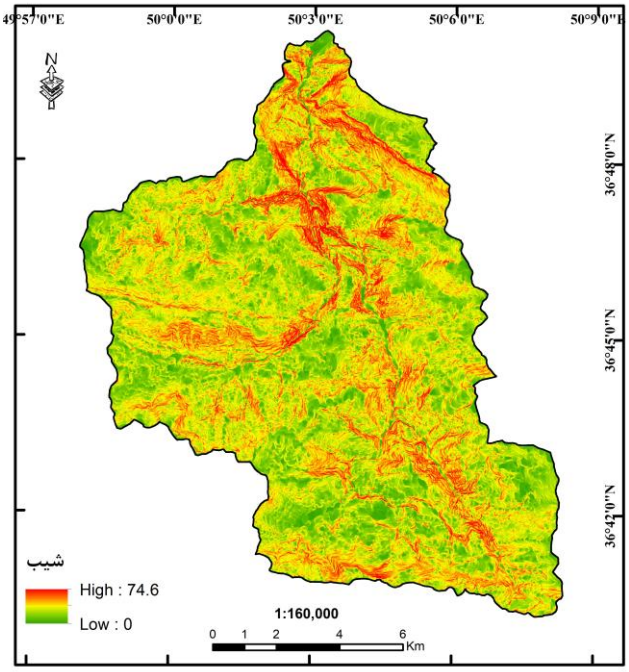
شکل ۵ . نقشه مدل ارتفاع رقومی (DEM) در حوزه آبخیز چاکرود

جدول ۲. مساحت و درصد هر یک از طبقات شیب در حوزه آبخیز چاکرود

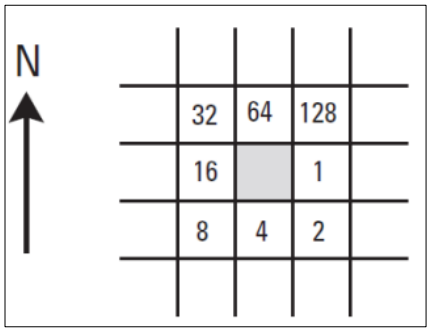
ردیف	طبقه شیب (درجه)	مساحت (هکتار)	درصد
۱	کمتر از ۵	۵۳۸/۲۴	۳/۴۳٪
۲	۵ تا ۱۵	۱۸۵۹/۷۹	۱۱/۸۵٪
۳	۱۵ تا ۲۵	۴۱۸۶/۷	۲۶/۶۷٪
۴	۲۵ تا ۳۵	۵۱۶۴/۹۵	۳۲/۹۰٪
۵	۳۵ تا ۴۵	۳۴۰۷/۹۴	۲۱/۷۱٪
۶	بیش از ۴۵	۵۳۹/۳۸	۳/۴۴٪

۲-۴-۳. جهت جریان و توزیع رواناب

با توجه به میزان نفوذپذیری مصالح زمین‌شناسی یا خاک سطحی، تمام یا قسمتی از آب بارندگی به داخل هر سلول نفوذ می‌کند. در مواقعی که میزان نفوذپذیری خاک سطحی از میزان نرخ بارش و رواناب ورودی از سلول‌های کناری کمتر باشد، قسمتی از آن به‌صورت رواناب درآمده و در جهت شیب دامنه (سلول‌های کناری تراز پایین‌تر) جریان می‌یابند. جهت تعیین حالت توزیع رواناب و مشخص‌کردن سلول‌های کناری و سهم هر یک از این سلول‌ها برای دریافت مقدار رواناب، مدل‌های مختلفی توسط پژوهشگران توصیه شده است. در این پژوهش از روش D8 برای تعیین توزیع رواناب استفاده شده است (O'Callaghan & Mark., 1984). در این روش رواناب اضافی از سلول موردنظر در جهت شیب توپوگرافی به یکی از هشت سلول مجاور انتقال می‌یابد (شکل ۶). نام‌گذاری در این سلول‌ها با شماره ۱ تا ۱۲۸ به‌صورت توانی از عدد دو می‌باشد. به طور طبیعی سلولی که در جهت شیب، ارتفاع کمتری داشته باشد رواناب اضافی را دریافت خواهد نمود.



شکل ۷ . نقشه شیب در حوزه آبخیز چاکرود



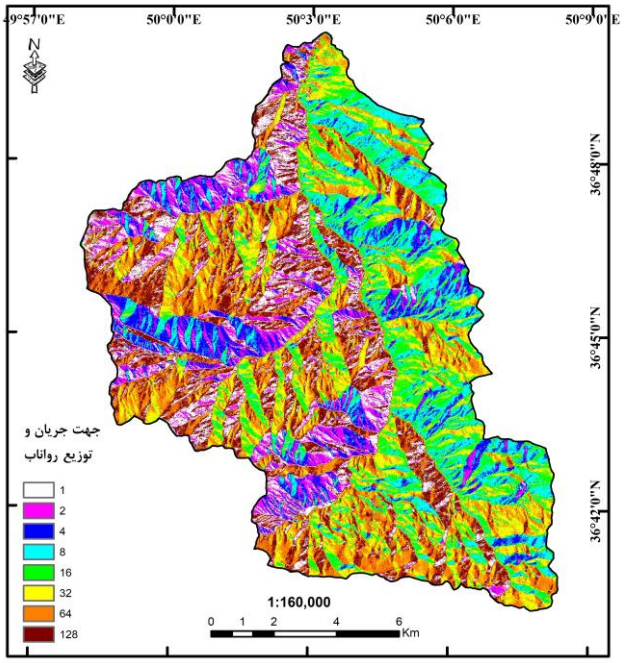
شکل ۶ . نحوه توزیع رواناب اضافی به سلول‌های کناری (O'Callaghan & Mark., 1984)

در پژوهش حاضر، جهت تعیین نحوه توزیع رولناب در حوضه موردمطالعه از برنامه توپواندکس (Topoindex) که در سازمان زمین‌شناسی آمریکا طراحی و همراه با برنامه تریگزر انتشار داده شده است، استفاده شد. این برنامه فایل متنی مدل ارتفاع رقومی و شیب توپوگرافی را به‌عنوان پارامترهای ورودی دریافت نموده و فایل‌های متنی متناسب و قابل‌استفاده در برنامه تریگزر را تولید می‌نماید. با استفاده از نرم‌افزار Arc Gis10.8 فایل متنی تولید شده به فایل Raster تبدیل می‌شود. شکل ۸ نقشه توزیع رواناب در حوزه آبخیز چاکرود را نشان می‌دهد.

۲-۴-۴. ضخامت یا عمق خاک (Zmax)

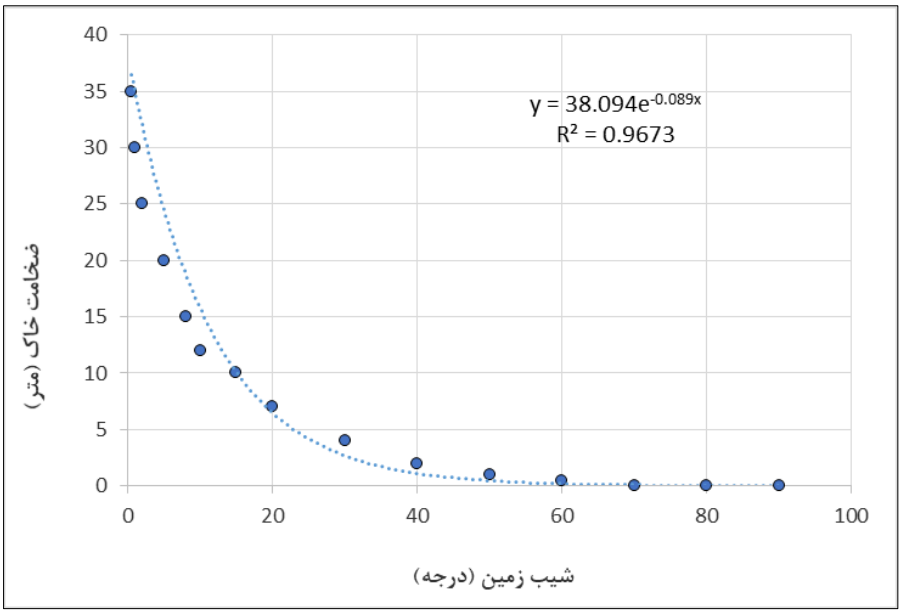
با توجه به این مطلب که در مدل‌سازی با برنامه تریگزر، ضریب اطمینان در عمق‌های مختلف خاک قرار گرفته بر روی بستر سنگی در امتداد صفحاتی موازی با شیب توپوگرافی و سطح سنگ‌بستر محاسبه می‌شود؛ بنابراین ضروری است ضخامت پوشش خاک برای حوضه موردمطالعه مشخص گردد. روش‌های متنوعی جهت تهیه نقشه ضخامت یا عمق خاک در یک منطقه وجود دارد (Catani et al., 2010, Delmonoaco et al., 2003).

یکی از روش‌ها، استفاده از روابط تجربی بین ضخامت خاک و شیب توپوگرافی است. در این پژوهش، با بررسی عمق خاک در دامنه‌های مختلف حوضه (شکل ۹)، یک رابطه تجربی با همبستگی ۹۷ درصد بین شیب زمین و ضخامت خاک منطقه به دست آمده است(شکل ۱۰). با استفاده از این رابطه، برای کل حوضه، نقشه عمق خاک تهیه گردید. شکل ۱۱ نقشه عمق خاک در حوزه آبخیز چاکرود را نشان می‌دهد. نکته قابل ذکر در ارتباط با تهیه این نقشه، لحاظ نمودن عمق خاک نزدیک به صفر در سلول‌ها و به عبارتی در پهنه‌های با برونزد کاملاً سنگی است که فارغ از میزان شیب آن‌هاست. این موضوع با مشاهدات صحرایی و کنترل تصاویر ماهواره‌ای حاصل شده است.

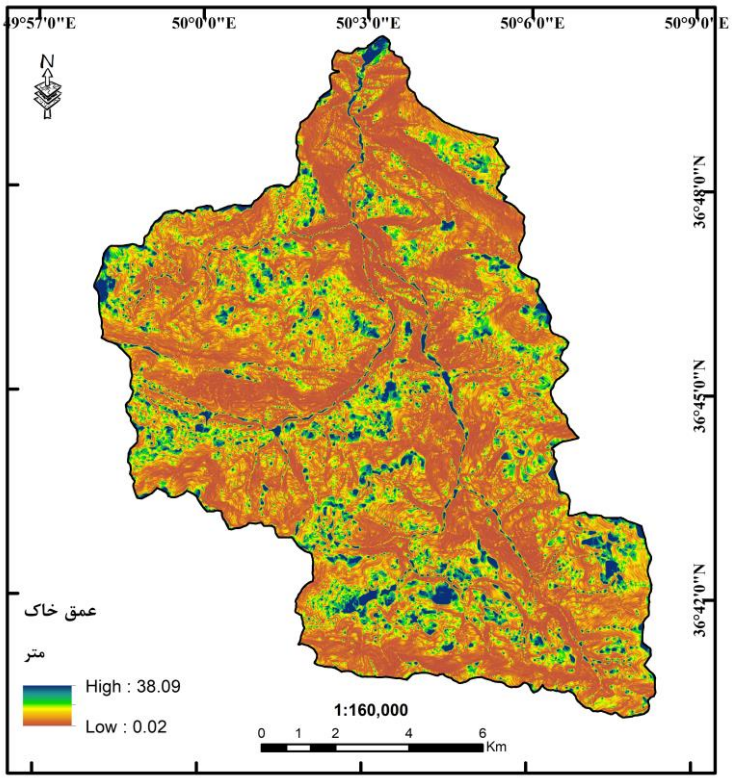


شکل ۸. نقشه جهت جریان و توزیع رواناب در حوزه آبخیز چاکرود

شکل ۹. تصاویر ضخامت خاک در نقاط با شیب‌های مختلف در حوضه



شکل ۱۰. رابطه تجربی ضخامت خاک با شیب زمین



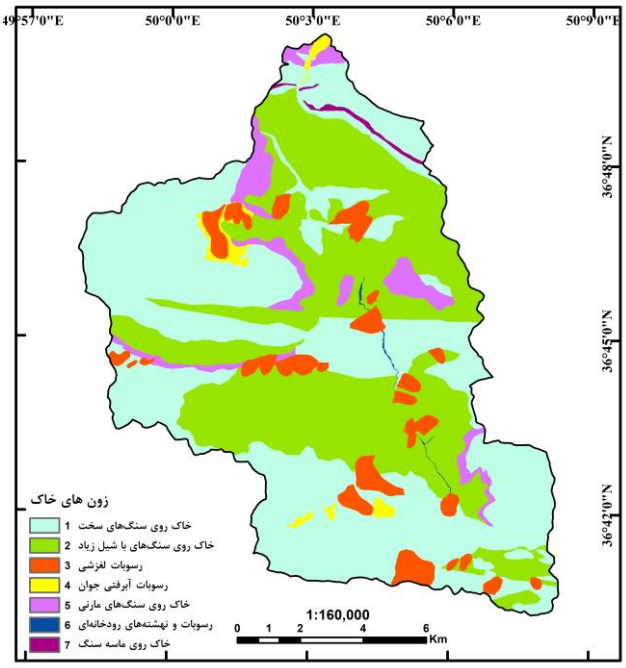
شکل ۱۱. نقشه ضخامت خاک (متر) در حوزه آبخیز چاکرود

۲-۴-۵. زون‌های زمین‌شناسی و خصوصیات ژئوتکنیکی خاک‌ها

یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش عامل سنگ‌شناسی است (Pourghasemi & Kerle., 2016). تشکیل انواع مختلف خاک و گسترش آن‌ها تابع سنگ‌شناسی یا به طور کلی وضعیت زمین‌شناسی هر حوضه است که این خاک‌ها تحت‌تأثیر انواع مختلفی از هوازدگی به وجود می‌آیند. در این حوضه انواع مختلفی از خاک‌های برجا (تشکیل شده بر روی سنگ‌بستر تحت هوازدگی) و نابرجا (شامل رسوبات و نهشته‌های آبرفتی، مواد و مصالح لغزشی، رسوبات رودخانه‌ای) گسترش دارند. تهیه نقشه زون‌های خاک حوضه بر اساس نقشه زمین‌شناسی حوضه انجام شده است. به این منظور نقشه زمین‌شناسی پایه حوزه آبخیز از نقشه‌های جواهرده و جیرنده با مقیاس یک‌صد هزارم از سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور تهیه گردیده است و مرز واحدهای زمین‌شناسی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و بررسی‌های میدانی و همچنین بهره‌گیری از نقشه توپوگرافی تدقیق شده است. سپس بر اساس سنگ‌شناسی واحدهای موجود، خاک‌های حوضه در زون‌های مختلف تفکیک گردیده است. جدول ۳ مشخصات زون‌های مختلف خاک در حوضه را نشان می‌دهد و شکل ۱۲ زون‌های مختلف خاک حوضه را نشان می‌دهد.

جدول ۳. مشخصات پارامترهای ژئوتکنیکی زون‌های خاک در حوزه آبخیز چاکرود

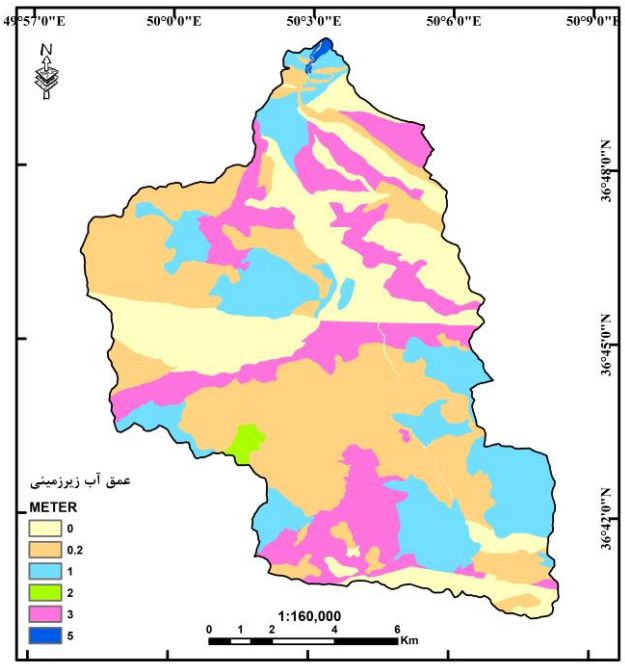
زون‌های خاک	نوع خاک	زاویه اصطکاک	چسبندگی (kpa)	دانسیته (gr/cm3)	ضریب هدایت هیدرولیکی	ضریب پخشیدگی	درصد رطوبت اشباع	درصد رطوبت باقیمانده	ضریبα
زون ۱	خاک روی سنگ‌های سخت	۳۵	۲۵	۲	۵×۱۰^{-۷}	۵×۱۰^{-۶}	۰/۴۵	۰/۰۵	-۰/۵
زون ۲	خاک روی سنگ‌های با شیل زیاد	۳۰	۲۵	۲/۱	۲×۱۰^{-۸}	۱×۱۰^{-۷}	۰/۴۵	۰/۰۵	-۰/۵
زون ۳	رسوبات لغزشی	۲۵	۱۵	۲	۳×۱۰^{-۵}	۵×۱۰^{-۴}	۰/۴	۰/۰۵	-۵
زون ۴	رسوبات آبرفتی جوان	۳۷	۲۰	۲/۱	۱×۱۰^{-۶}	۵×۱۰^{-۴}	۰/۳۵	۰/۰۵	-۵
زون ۵	خاک روی سنگ‌های مارنی	۳۰	۳۵	۲/۱	۱×۱۰^{-۸}	۱×۱۰^{-۷}	۰/۴۵	۰/۰۵	-۰/۵
زون ۶	رسوبات و نهشته‌های رودخانه‌ای	۴۰	۱۰	۲/۲	۱×۱۰^{-۵}	۵×۱۰^{-۴}	۰/۳۵	۰/۰۵	-۵
زون ۷	خاک روی ماسه‌سنگ	۳۲	۳۰	۲/۱	۳×۱۰^{-۷}	۱×۱۰^{-۷}	۰/۴۵	۰/۰۵	-۰/۵



شکل ۱۲. نقشه زون‌های خاک در حوزه آبخیز چاکرود

۲-۴-۶. عمق سطح آب زیرزمینی

از دیگر داده‌های موردنیاز در برنامه تریگرز که عامل مهمی در ناپایداری شیب محسوب می‌شود، عمق سطح آب زیرزمینی می‌باشد. عمق سطح آب زیرزمینی در واقع تعیین‌کننده مرز محدوده‌های اشباع و غیر اشباع خاک است. در پژوهش حاضر جهت برآورد عمق سطح آب زیرزمینی از نقشه‌های موقعیت منابع آب، زمین‌شناسی، شیب توپوگرافی، ضخامت خاک و کاربری اراضی بهره گرفته شده است. شکل ۱۳ عمق سطح آب زیرزمینی حوضه را نشان می‌دهد.



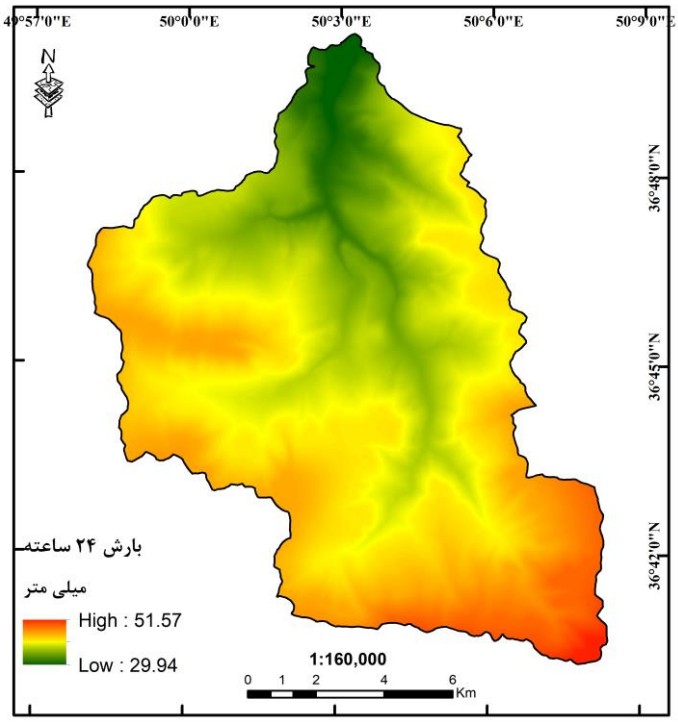
شکل ۱۳. نقشه عمق آب زیرزمینی در حوزه آبخیز چاکرود

۲-۴-۷. شدت و مدت بارش

همان‌گونه که اشاره شد، برنامه تریگرز وقوع زمین لغزش‌های کم‌عمق ناشی از بارندگی را پیش‌بینی می‌کند، به این منظور می‌بایست میزان بارش مبنای موردنظر را برای ارائه در برنامه مشخص نمود. شدت و مدت این بارندگی رطوبت خاک، فشار آب منفذی و در نهایت مقاومت برشی خاک را تعیین می‌نماید. بارندگی و نفوذ آن به داخل زمین به‌عنوان عوامل اصلی زمین‌لغزش شناخته می‌شوند. مکانیسمی که بارندگی باعث ناپایداری شیب می‌شود به گونه‌ای است که وقتی آب باران به زون غیراشباع خاک نفوذ می‌کند، مکش کالبدی و در نتیجه مقاومت برشی خاک را کاهش می‌دهد. ازدست‌رفتن مکش کالبدی، مقاومت برشی خاک را به کمتر از مقاومت برشی بسیج شده بر روی سطح لغزش بالقوه می‌رساند. هنگامی که کاهش مقاومت برشی خاک به حد معینی برسد، گسیختگی شیب ممکن است رخ دهد. در این پژوهش، نقشه شدت بارش در حوضه نیز بر اساس شدت بارش ۲۴ ساعته در حوضه تهیه گردید (شکل ۱۴). برآورد میزان بارش توسط اطلاعات و آمار ایستگاه‌های اطراف حوضه مورد مطالعه صورت گرفته است. برای این‌کار، ابتدا آمار ایستگاه‌های موردنظر در طی سال‌های ۱۳۷۸-۱۳۹۹ پس از اصلاح و بازسازی، جمع‌آوری و پارامترهای آماری شامل حداکثر، حداقل، متوسط، انحراف معیار و ضریب تغییرات مربوطه محاسبه گردید. داده‌های ایستگاه‌های ناقص از طریق روابط همبستگی با سایر ایستگاه‌ها، بازسازی و تکمیل گردیده است. از طریق ایجاد روابط همبستگی بین مقادیر بدست آمده و ارتفاع ایستگاه‌ها و سپس تعمیم آمار بارش ۲۴ ساعته برای حوزه آبخیز مورد مطالعه، مقادیر حداکثر بارش ۲۴ ساعته ایستگاه‌های مورد نظر برآورد شده است (جدول ۴).

جدول ۴. مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی اطراف حوضه مورد مطالعه

ردیف	نام ایستگاه	نوع	حداکثر بارش ۲۴ ساعته (mm)	UTM Y	UTM X	ارتفاع از سطح دریا (متر)
۱	کاکرود	تبخیر سنجی	۴۱	۴۰۷۳۸۵۶	۴۳۵۲۵۶	۱۲۸۰
۲	موسی کلایه	باران‌سنجی معمولی	۳۰	۴۰۷۷۴۷۱	۴۱۶۵۰۸	۱۰۲۱
۳	پیرکوه	تبخیر سنجی + باران‌سنج ذخیره‌ای	۳۲	۴۰۷۵۷۲۷	۴۱۲۱۳۰	۱۴۰۰
۴	دیارجان	باران‌سنجی معمولی	۴۴	۴۰۸۲۴۵۵	۴۱۱۲۳۴	۱۴۶۰



شکل ۱۴. نقشه بارش ۲۴ ساعته حوزه آبخیز چاکرود

۳. یافته‌های پژوهش

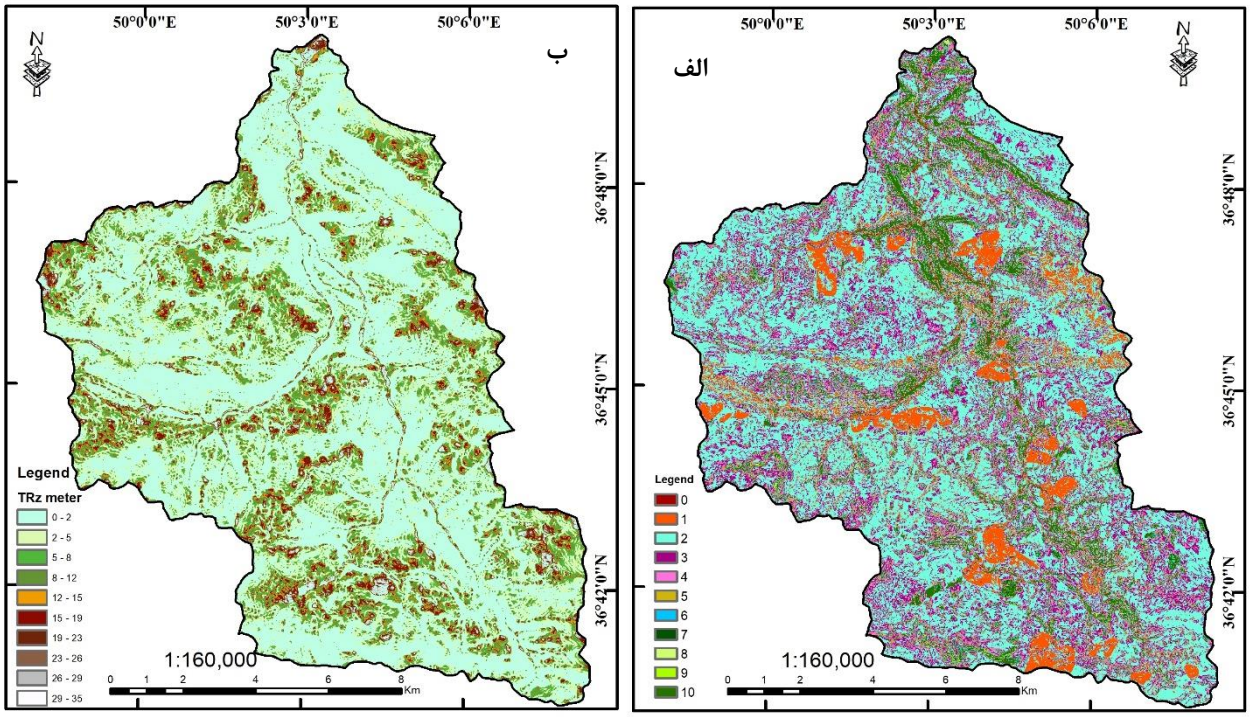
پس از تهیه کلیه پارامترهای موردنیاز برنامه TRIGRS به‌صورت نقشه رستری، لازم است که این لایه‌ها و نقشه‌های اطلاعاتی تهیه شده، به‌صورت فایل متنی آماده گردد؛ زیرا برنامه TRIGRS تنها از فایل‌های متنی (TXT) پشتیبانی می‌کند و لذا ضروری است فایل‌های ورودی به‌صورت فایل با پسوند TXT ذخیره شود. به این منظور از نرم‌افزار ArcGIS استفاده شده و با دستور Raster to ASCII، نقشه‌های رستری به فایل متنی تبدیل شد. در نهایت برنامه تریگرز با ورودی‌های متنی اشاره شده در بالا، اجرا شده و فایل‌ها و خروجی‌های مختلفی ارائه می‌دهد که سه نوع آن‌ها شامل ضریب ایمنی حداقل، عمقی که ضریب ایمنی حداقل در آن رخ می‌دهد و فشار آب منفذی در آن عمق از جمله فایل‌های اصلی می‌باشند. این برنامه سه پارامتر مورد اشاره را برای همه سلول‌های شبکه مورد بررسی محاسبه نموده و به‌صورت فایل‌های متنی (TXT) ارائه می‌کند. در نتیجه برای تحلیل فایل‌های ساخته شده، مجدداً با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS و این بار با دستور ASCII to Raster فایل‌ها به نقشه‌های رستری تبدیل می‌گردد.

جدول ۵. مساحت و درصد هر یک از طبقات شیب در حوزه آبخیز چاکرود

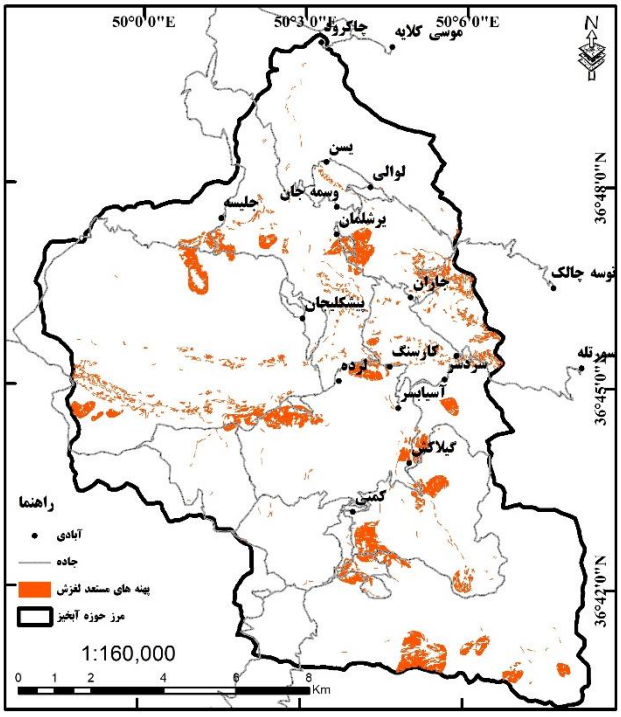
ردیف	ضریب ایمنی	مساحت (هکتار)	درصد
۱	کمتر از ۱	۳۸/۷۶	۰/۲۵٪
۲	۱	۱۳۵۶/۶۱	۸/۶۴٪
۳	۲	۷۱۹۸/۴۹	۴۵/۸۶٪
۴	۳	۲۹۴۹/۹۹	۱۸/۷۹٪
۵	۴	۱۲۷۶/۵	۸/۱۳٪
۶	۵	۷۳۵/۰۸	۴/۶۸٪
۷	۶	۵۳۲/۷۲	۳/۳۹٪
۸	۷	۳۷۳/۹۷	۲/۳۸٪
۹	۸	۲۲۶/۸	۱/۴۴٪
۱۰	۹	۱۵۶/۲۹	۱/۰۰٪
۱۱	۱۰	۸۵۱/۷۹	۵/۴۳٪

همان‌گونه که اشاره شد برنامه TRIGRS با استفاده از شبیه‌سازی نفوذ بارش و مسیریابی رواناب، پایداری دامنه را بررسی کرده و زمان و مکان ایجاد ناپایداری را مشخص می‌کند. بر این اساس با استفاده از کلیه اطلاعات ورودی و پارامترهای مربوط به خصوصیات خاک و بارش در بازه زمانی ۲۴ ساعته با شدت مشخص در حوزه آبخیز چاکرود، شبیه‌سازی صورت گرفت و نقشه نهایی ضریب ایمنی برای سلول‌های مختلف به دست آمد. شکل ۱۵ الف و ب به ترتیب نقشه ضریب ایمنی حداقل و عمق رویداد ضریب ایمنی حداقل را برای حوزه آبخیز چاکرود نشان می‌دهد. بر اساس این نقشه سلول‌هایی که نرم‌افزار پس از آنالیز داده‌ها و مدل‌سازی نفوذ و مسیریابی رواناب به‌عنوان سلول‌های ناپایدار و دارای ضریب ایمنی ۱ و کمتر از ۱ پیش‌بینی کرده با محلی که زمین‌لغزش‌های حوضه رخداده است، همخوانی دارد. علاوه بر این مناطق لغزشی، در بخش‌های دیگری از حوضه نیز میزان ضریب ایمنی حداقل کمتر از ۱ می‌باشد که نشان می‌دهد این نقاط نیز بسیار مستعد بروز زمین‌لغزش‌های کم‌عمق می‌باشد.

با مقایسه نقشه ضریب ایمنی حداقل (شکل ۱۵-الف) با نقشه زون‌های تفکیک شده (شکل ۱۲) مشخص شد که مقادیر ضریب ایمنی در بخش‌هایی از زون ۲ و ۳ کمتر از سایر زون‌ها و مقدار آن ۱ و کمتر از ۱ می‌باشد؛ لذا طبق این نقشه و جدول ۵ حدود ۱۳۹۵/۳۷ هکتار از حوزه آبخیز معادل ۸/۹ درصد، استعداد وقوع زمین لغزش در بارندگی‌های شدید را دارد. براساس جدول زون‌های موجود در حوضه، زون ۲، متشکل از خاک‌های برجایی است که بر روی سنگ‌هایی با شیل زیاد یا غنی از کانی‌های رسی (سازند شمشک) و زون ۳ شامل زمین لغزش‌های روی‌داده در حوضه است که موقعیت آن‌ها در نقشه زمین شناسی و نقشه زون‌های خاک آورده شده است. در منطقه مورد بررسی سنگ‌های با شیل فراوان از جمله سازند شمشک گسترش وسیعی در حوضه دارند و همین امر در کنار سایر عوامل از جمله شیب بالا، بارش زیاد و ضخامت زیاد خاک حاصل از هوازدگی سبب می‌شود که پتانسیل وقوع ناپایداری‌ها در منطقه بالا بوده و زمین‌لغزش‌های کم‌عمق ناشی از بارندگی احتمال وقوع بیشتری داشته باشند.



شکل ۱۵. الف) نقشه ضریب ایمنی حداقل، ب) نقشه عمق رویداد ضریب ایمنی حداقل در حوزه آبخیز چاکرود



شکل ۱۶. نقشه موقعیت پهنه‌های مستعد زمین لغزش حوزه آبخیز چاکرود

۴. بحث و نتیجه‌گیری

استان گیلان، با توجه به شرایط خاص زمین‌شناسی، ژئومورفولوژی، اقلیمی، آب‌های زیرزمینی، سرعت تغییرات کاربری اراضی، شاهد وقوع حرکت‌های توده‌ای متنوع و فراوان همراه با خسارات مالی، جانی و فرسایش شدید خاک است. خسارت‌های ناشی از زمین‌لغزش‌ها بر منابع طبیعی، ساختمان‌ها، جاده‌ها و تأسیسات گاهی مواقع جبران‌ناپذیر است. از مهم‌ترین راهکارهای کاهش این خسارات، شناسایی مناطق مستعد وقوع زمین‌لغزش با روش‌های پیش‌بینی و پهنه‌بندی در مقیاس‌های ملی، منطقه‌ای و محلی است تا با بهره‌گیری از آن بتوان مناطق حساس را شناسایی و راهکارهای اجرایی متناسب ارائه و از وقوع خسارات جلوگیری نمود. در مجموع می‌توان چنین بیان نمود که در مناطقی که از زون‌های زمین‌شناسی با مقاومت کم و هوازدگی زیاد و عمق قابل‌توجهی از خاک تشکیل شده و خاک‌هایی که دارای مشخصه‌های ژئوتکنیکی ضعیف هستند و عمق سطح آب زیرزمینی نیز کم است، خطر زمین‌لغزش در آن مناطق از احتمال بیش‌تری برخوردار بوده است. علاوه بر این عوامل، دامنه‌های پرشیب حوضه نیز تأثیر به سزایی در ناپایداری‌ها و مناطق مستعد زمین‌لغزش دارند و نقش شدت و مدت بارش نیز در مناطق دارای پتانسیل وقوع زمین‌لغزش چشمگیر است؛ لذا در کنار هم قرارگرفتن این عوامل، سبب ایجاد بستری مناسب برای بروز زمین‌لغزش می‌شود.

در همین راستا در این پژوهش با استفاده از برنامه تریگرز و بر اساس شبیه‌سازی نفوذ بارش و مسیریابی رواناب، ارتباط بین بارش با وقوع زمین‌لغزش‌های کم‌عمق در حوزه آبخیز چاکرود مورد بررسی قرار گرفت و نتایج به دست آمده با بررسی‌های میدانی و زمین‌لغزش‌های رخداده در منطقه همخوانی دارد. علاوه بر این، نتایج نشان داد که در مناطقی که خاک‌های برجا بر روی سازندهایی با شیل زیاد از جمله سازند شمشک در حوزه آبخیز چاکرود قرار دارند، پتانسیل وقوع زمین‌لغزش کم‌عمق بر اثر بارندگی بالا است. این پژوهش نشان داده که در وقوع زمین‌لغزش‌های کم‌عمق در حوضه، جنس خاک و شیب منطقه مهم‌ترین تأثیر را دارند و شدت و مدت بارندگی عامل محرک در وقوع زمین‌لغزش می‌باشد؛ لذا در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش‌های ناشی از بارندگی، این عوامل می‌بایست بیشتر موردتوجه قرار گیرند. در برنامه تریگرز (TRIGRS) علاوه بر اینکه عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش مورد بررسی قرار می‌گیرد، زمین‌لغزش‌های کم‌عمق ناشی از بارندگی شبیه‌سازی‌شده و مکانیسم رخداد زمین‌لغزش موردتوجه قرار می‌گیرد که در سایر روش‌ها کمتر مورد بررسی قرار می‌گیرد. این برنامه ضریب ایمنی را در هر نقطه از حوضه محاسبه می‌نماید که می‌تواند معیار مناسبی برای مشخص‌کردن پایداری دامنه‌ها باشد.

نتایج به دست آمده در این مطالعه، نشان‌دهنده پتانسیل زیاد بخش‌هایی از حوضه موردمطالعه جهت ایجاد زمین‌لغزش‌های کم‌عمق است. این بخش‌ها بر قسمت‌هایی از زون ۲، متشکل از خاک‌های با شیل زیاد و حاوی کانی‌های رسی فراوان و زون ۳ شامل خاک‌ها و رسوبات لغزشی که در دامنه‌های پرشیب و همراه با ضخامت زیاد خاک است، منطبق می‌باشد. پهنه‌های مورد بحث، حدود ۱۳۹۵/۳۷ هکتار معادل ۸/۹ درصد از مساحت حوزه آبخیز را تشکیل داده و برخی نقاط مهم حوزه آبخیز مورد مطالعه نظیر جاده و همچنین مناطق سکونتگاهی را دربرمی‌گیرد؛ لذا نتایج حاصل از این پژوهش می‌تواند به مسئولین امر و تصمیم‌گیران کمک زیادی کند تا بتوانند بر اساس داده‌های مکانی، جهت کاهش این مخاطره، بهتر برنامه‌ریزی نمایند.

نتایج مطالعات مشابه مانند بررسی حوزه آبخیز بابل رود مازندران از نظر پتانسیل رخداد زمین‌لغزش‌های کم عمق و جریان‌های واریزه‌ای توسط عبدی‌نژاد و همکاران (۲۰۲۳) با نتایج پژوهش حاضر تطابق زیادی دارد؛ به طوری‌که در مطالعات ایشان نیز اغلب زمین لغزش‌ها و جریان‌های واریزه‌ای و گِلی در خاک‌هایی اتفاق افتاده‌اند که بر روی سنگ بستر با ترکیب رسی مانند شیل و مارن قرار دارند.

References

Abdinezhad, A., Yamani, M., Hassanpour, J., Goorabi, A. & Karimi AhmadAbad, M. (2023). Analysis of occurrence potential of the earth/debris flow and shallow landslides using the TRIGRS model (Case study: babolrood Basin, Mazandaran). *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*, *10*(2), 21-44. (In Persian)

Alvioli, M., Melillo, M., Guzzetti, F., Rossi, M., & Palazzi, E., Von Hardenberg, J., Brunetti, M,T. & Peruccacci, S. (2018). Implications of climate change on landslide hazard in Central Italy. *Science of the Total Environment*, *630*,1528–1543.

Baum, R.L., Godt, J.W. & Savage, W.Z. (2010). Estimating the timing and location of shallow rainfall-induced landslides using a model for transient, unsaturated infiltration. *Journal of Geophysical Research, 115*(3), 1-26.

Baum, R.L., Savage, W.Z. & Godt, J.W. (2002). TRIGRS—A Fortran program for transient rainfall infiltration and grid-based regional slope stability analysis. U.S. Geological Survey Open-File Report 2002-0424.

Baum, R.L., Savage, W.Z. & Godt, J.W. (2002). TRIGRS—A Fortran Program for Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability Analysis, Version 2.0. U.S. Geological Survey Open-File Report 2008– 1159.

Catani, F., Segoni, S. & Falorni, G. (2010). An empirical geomorphology-based approach to the spatial prediction of soil thickness at catchment scale. *Water Resources Research* 46, W05508.

Ciurleo, M., Ferlisi, S., Foresta, V., Mandaglio M.C. & Moraci, N. (2022). Landslide Susceptibility Analysis by Applying TRIGRS to a Reliable Geotechnical Slope Model. *Geosciences (Switzerland), 12*(1). https://doi.org/10.3390/geosciences12010018.

Delmonaco, G., Leoni, G., Margottini, C., Puglisi C. & Spizzichino, D. (2003). Large scale debris flow hazard assessment: a geotechnical approach and GIS modeling. *Natural Hazards and Earth System Sciences 3*(5), 443–455.

Freeze, R. A. & Cherry, J. A. (1979). *Groundwater*. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs , New Jersey . 604 pp.

Goetz, J. N., Guthrie, R. H. & Brenning, A. (2011). Integrating physical and empirical landslide susceptibility models using generalized additive models. *Journal of Geomorphology 129* (3-4), 376-386.

Grelle, G., Soriano, M., Revellino, P., Guerriero, L., Anderson, M.G., Diambra, A., Fiorillo, F., Esposito, L., Diodato, N. & Guadagno, F.M. (2014). Space-Time Prediction of Rainfall-Induced Shallow Landslides through a Combined Probabilistic/Deterministic Approach, Optimized for Initial Water Table Conditions. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, *73*(3), 877-890.

Hassanzadeh Nafuti, M. (2000). *Landslide hazard zonation in Shalmanrood basin in Gilan province*. Master dissertation, Natural Resources Faculty of Tehran University, Tehran. (In Persian)

Liao, Z., Hong, Y., Kirschbaum, D., Adler, R.F., Gourley, J.J. & Wooten, R. (2011). Evaluation of TRIGRS (transient rainfall infiltration and grid-based regional slope-stability analysis)'s predictive skill for hurricanetriggered landslides: a case study in macon county, north carolina, Nat. *Hazards, 58*(1), 325-339.

Nahayo, L., Mupenzi, C., Habiyaremye, G., Kalisa, E., & Udahogora, M.& Nzabarinda, V., & Li, L. (2019). Landslides hazard mapping in Rwanda using bivariate statistical index method. *Environmental Engineering Science, 36*(8), 892-902.

O'Callaghan, J.F. & Mark, D.M. (1984). The Extraction of Drainage Networks from Digital Elevation Data. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 28*(3), 323-344.

Ocakoglu, F., Gokceoglu, C. & Ercanoglu, M. (2002). Dynamics of a complex mass movement triggered by heavy rainfall: a case study from NW Turkey. *Geomorphology, 42*(3), 329-341.

Park, D.W., Nikhil, N.V. & Lee S.R. (2013). Landslide and debris flow susceptibility zonation using TRIGRS for the 2011 Seoul landslide event. *Natural Hazards and Earth System Science, 1*(3), 2547-2587.

Pourghasemi, H. R. & Kerle, N. (2016). Random forests and evidential belief function-based landslide susceptibility assessment in Western Mazandaran Province, Iran. *Environmental Earth Sciences, 75*(3).

Sadeghi, S., Shoaei, Gh. & Nikude, M. (2014). Attitudes to prediction of time and place of occurrence of shallow landslides caused by rainfall in Nekarod Basin. Paper presented at the 18th conference of the Geological Society of Iran. Tehran, Iran.

Schilirò, L., Cepeda, J., Devoli, G. & Piciullo, L. (2021). Regional Analyses of Rainfall-Induced Landslide Initiation in Upper Gudbrandsdalen (South-Eastern Norway) Using TRIGRS Model. *Geosciences, 11*(1), 35.

Schilirò, L., Esposito, C. & Scarascia Mugnozza, G. (2015). Evaluation of shallow landslide triggering scenarios through a physically-based approach: an example of application in the southern Messina area (north-eastern Sicily, Italy). *Natural Hazards and Earth System Science, 3*(5), 2975-3022.

Vieira, B. C., Fernandes, N. F., Augusto Filho, O., Martins, T. D.& Montgomery, D. R. (2018). Assessing shallow landslide hazards using the TRIGRS and SHALSTAB models, Serra do Mar, Brazil. *Environmental earth sciences, 77*(6), 1-15.

Vieira, B.C., Fernandes, N.F. & Filho, O.A. (2010). Shallow landslide prediction in the Serra do Mar, S˜ao Paulo, Brazil. *Natural Hazards and Earth System Science, 10*(9), 1829–1837.

Viet, T.T., Lee, G., Thu, T.M. & An, H. (2017). Effect of Digital Elevation Model Resolution on Shallow Landslide Modeling Using TRIGRS. *Natural Hazards Review, 18* (2).