نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، سال دهم، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۲

صفحات ۲۱ – ٤٤

تحلیل استعداد رخداد جریان‌های واریزه‌ای و لغزش‌های کم‌عمق با استفاده از مدل تریگرز (TRIGRS) (مطالعه موردی: حوضهٔ آبخیز بابل‌رود مازندران)

علی عبدی‌نژاد؛ دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران

مجتبی یمانی؛ استاد گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران

جعفر حسن‌پور[1]؛ دانشیار گروه زمین شناسی مهندسی، دانشکده زمین‌شناسی، دانشکدگان علوم، دانشگاه تهران

ابوالقاسم گورابی؛ دانشیارگروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران

مصطفی کریمی احمد آباد؛ دانشیارگروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران

دریافت مقاله :۱۴۰۲/۰۴/۰۶ پذیرش نهایی:۱۴۰۲/۰۶/۰۵

چکیده

در این مطالعه، به بررسی پتانسیل وقوع زمین‌لغزش‌های کم‌عمق ناشی از بارندگی در حوضهٔ آبخیز بابل‌رود پرداخته شده است. در این حوضه به دلیل توپوگرافی کوهستانی (شیب تند دامنه‌ها) و وجود خاک‌های حاوی مواد آلی به صورت طبیعی پتانسیل رخداد اینگونه زمین‌لغزش‌های ناشی از بارندگی زیاد است و سالانه زمین‌لغزش‌هایی با ابعاد مختلف بعد از وقوع بارندگی‌های شدید و طولانی‌مدت در آن رخ می‌دهد. این زمین‌لغزش‌ها که با مکانیسم لغزش در بخش‌های بالایی پوشش خاک آغاز می‌شوند، بلافاصله تبدیل به جریان‌های گلی-واریزه‌ای شده و از به هم پیوستن آنها ممکن است جریان‌های واریزه‌ای-گلی بزرگ در پایین‌دست حوضه شکل بگیرد که پدیده‌ای مخرب محسوب می‌شود. در این پژوهش، برای بررسی تأثیر بارندگی بر وقوع زمین‌لغزش‌های کم‌عمق و جریان‌های واریزه‌ای-گِلی از برنامهٔ تریگرز (TRIGRS) که برنامه‌ای نسبتاً جامع و مبتنی بر شبکه برای تحلیل پایداری شیب به روش شیب بی‌نهایت (در مقیاس ناحیه‌ای) است، استفاده شده است. در این برنامه اثر نفوذ آب باران در خاک و رواناب ناشی از بارندگی که پارامترهایی مهم در ایجاد زمین‌لغزش‌های کم‌عمق و متعاقب آن جریان‌های واریزه‌ای-گلی هستند نیز به طور کامل در نظر گرفته می‌شود و این پدیدهٔ طبیعی به طور کامل شبیه‌سازی می‌گردد. داده های ورودی مورد نیاز برای این پژوهش شامل داده‌های توپوگرافی حوضه، ویژگی‌های زمین‌شناسی، زمین‌شناسی مهندسی و هیدروژئولوژیکی واحدهای خاکی (زون‌های زمین‌شناسی) و داده‌های مربوط به بارش در منطقه است که از منابع مختلف تهیه و در قالب فایل‌های متنی و نقشه‌های GIS مناسب مرتب‌سازی شده و مورد استفاده قرار گرفته‌اند. خروجی برنامهٔ تریگرز شامل نقشه‌های توزیع مکانی حداقل ضریب ایمنی پایداری، عمق وقوع لغزش و فشار آب منفذی در عمق وقوع لغزش هستند که در قالب فایل‌های متنی تهیه و بعد از ترسیم در نرم‌افزارهای مبتنی بر GIS قابل تفسیر هستند. نتایج این مطالعه نشان داد که در بخش‌های مرتفع و پرشیب حوضه هرجا که خاک‌هایی با سنگ‌بستر از جنس سنگ‌های غنی از کانی‌های رسی (مثل گلسنگ، مارن و شیل) گسترش بیشتری دارند، پتانسیل رخداد لغزش‌های کم‌عمق ناشی از بارندگی بالاست و با وقوع بارندگی‌های با شدت بالا و مدت طولانی، این نوع زمین‌لغزش‌ها رخ خواهند داد که در صورت نزدیکی به سکونتگاه‌ها و جاده‌ها می‌توانند ریسک بالایی برای آنها داشته باشند. در بررسی‌های صحرایی صورت گرفته، همخوانی خوبی میان نتایج این مطالعه با تجربیات حاصل از مشاهدات صحرایی زمین‌لغزش‌های ناشی از بارندگی در منطقه از نظر توزیع مکانی و زمان وقوع آنها به دست آمد.

واژه‌های کلیدی: زمین‌لغزش کم‌عمق، فشار آب منفذی، زمین‌لغزش ناشی از بارندگی

[1] نویسنده مسئول: Email: hassanpour@ut.ac.ir

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.24237892.1402.10.2.2.7]

[DOI: 10.61186/jsaeh.10.2.21]

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.24237892.1402.10.2.2.7]

[DOI: 10.61186/jsaeh.10.2.21]

مقدمه

زمین‌لغزش‌های ناشی از بارندگی از جمله پدیده‌های رایجی هستند که در نقاط مختلف دنیا به طور مکرر اتفاق می‌افتند و سالانه با شروع فصل بارندگی، باعث تلفات جانی و خسارات مالی فراوانی به ویژه در مناطقی که از زیرساخت‌های لازم برای مقابله با این پدیده برخوردار نیستند، می‌شوند. اغلب زمین‌لغزش‌های ناشی از بارندگی ابتدا لغزش‌هایی کم‌عمق و سطحی بوده و در ادامه به جریان‌های گلی و واریزه‌ای تبدیل می‌شوند. بنابراین، بررسی استعداد وقوع لغزش‌های کم‌عمق بعد از بارندگی‌ها، در عمل می‌تواند در تعیین استعداد وقوع جریان‌های گلی-واریزه‌ای نیز مفید باشد. این پدیده وابستگی زیادی به شرایط اقلیمی و ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی، زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیکی منطقه دارد. تغییرات اقلیمی ناشی از گرم شدن زمین (تغییر الگوی بارش‌ها) می‌تواند تأثیرات شگرفی بر فراوانی رخداد آنها در آینده داشته باشد. بنابراین، لازم است با شناخت عوامل مختلف تأثیرگذار بر رخداد این پدیده طرح‌های مناسب کاهش ریسک به ویژه در مناطق پرخطر اجرا شوند.

در ایران نیز در نقاط کوهستانی و پرشیب که بارندگی‌های شدید و طولانی دارند این پدیده بسیار راج است. به عنوان مثال، در اواخر اسفند ۱۳۹۷، بارندگی‌های طولانی‌مدت و شدیدی در اغلب نقاط ایران از جمله استان مازندران در شمال ایران به وقوع پیوست. علاوه بر وقوع سیلاب در مسیر اکثر رودخانه‌های دائمی و فصلی، یکی از عواقب مهم این بارندگی‌ها، وقوع حرکات دامنه‌ای به صورت لغزش‌های کم‌عمق (و متعاقب آن جریان‌های واریزه‌ای) در شیب‌های طبیعی و خاکریزها و ترانشه‌های جاده‌ها و تخریب تعداد زیادی از منازل و راه‌های روستایی بود. در این واقعه، در حوضهٔ آبخیز بابل رود نیز تعداد زیادی زمین‌لغزش کم‌عمق با ابعاد کوچک تا متوسط به دلیل افزایش درصد رطوبت و اشباع شدن بخش‌هایی از مصالح تشکیل‌دهنده دامنه‌ها و در نتیجه افزایش فشار آب منفذی و کاهش مقاومت برشی خاک‌ها به‌وقوع پیوست که خسارات قابل‌توجهی را برجا گذاشت.

اگرچه، زمین‌لغزش‌های ناشی از بارندگی در بسیاری از شرایط زمین‌شناسی و مورفولوژیکی پدیده‌هایی رایج هستند (Brabb and Harrod, ۱۹۸۹) و مطالعات زیادی برای شناخت دقیق نحوه عملکرد این عامل صورت گرفته است، اما تجربیات به‌دست آمده از مطالعات انجام شده در مناطق مختلف به نتایج متفاوتی در مورد اهمیت و نقش بارندگی‌ها در رخداد ناپایداری در دامنه‌های طبیعی منجر شده است (Morgenstern, ۱۹۹۲). بنابراین شناخت دقیق این پدیده همچنان موضوعی مهم و اساسی در ژئوتکنیک و زمین‌شناسی مهندسی محسوب می‌شود و لازم است نحوهٔ تأثیر بارش‌ها و به‌ویژه دو پارامتر مهم بارش یعنی شدت و مدت آن در وقوع زمین‌لغزش در هر منطقه با استفاده از روش‌های مناسب مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد. برای هر منطقه می‌توان با استفاده از روش‌های تجربی و تحلیلی مناسب بارش‌هایی را مشخص نمود که به عنوان بارندگی‌های آستانهٔ لغزش شناخته می‌شوند و در صورت وقوع آنها دامنه‌های طبیعی زیادی ناپایدار گشته و زمین‌لغزش‌های متعددی رخ می‌دهند.

یکی از روش‌های مناسب برای تحلیل لغزش‌های کم‌عمق استفاده از مدل شیب بی‌نهایت[۱] همراه با در نظر گرفتن اثر نفوذ آب باران به داخل زمین، جریان زیرسطحی آب نفوذی و مسیریابی رواناب ایجاد شده است. به منظور به کارگیری ترکیب این روش‌ها برای تعیین ضریب ایمنی پایداری دامنه‌ها در یک حوضه، لازم است از یک برنامهٔ مبتنی بر شبکه مثل برنامهٔ تریگرز[۲]

---

[۱] Infinite slope

[۲] **T**ransient **R**ainfall **I**nfiltration and **G**rid-Based **R**egional **S**lope-Stability Analysis (TRIGRS)

استفاده نمود (به بند ۲-۳ مراجعه شود).

اگرچه برنامهٔ تریگرز مورد توجه محققین بسیاری در سطح بین‌المللی بوده است، اما در ایران تنها یک بار توسط صادقی و همکاران (۱۳۹۳) جهت پیش‌بینی زمان و مکان وقوع زمین‌لغزش‌های سطحی در حوضه نکارود استفاده شده است. در این پژوهش پارامترهای مکانیکی، زمین‌شناسی و هیدرولوژیکی منطقه مورد مطالعه با انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی و برجا بدست آمده و سناریوی بارش مربوط به زمین‌لغزش شاخص نیز برای مدل‌سازی استفاده شده است. از جمله نتایج این پژوهش می‌توان به نقش موثرتر نوع خاک و خصوصیات مکانیکی و هیدرولوژیکی آن بر ناپایداری شیب‌ها نسبت به شدت و مدت بارش و ویژگی‌های زمین‌ریخت‌شناسی اشاره کرد.

در سطح بین المللی از برنامهٔ تریگرز جهت پیش‌بینی زمان و مکان وقوع زمین‌لغزش‌های تحریک شده توسط بارش، در مطالعات مختلف استفاده شده است. به عنوان مثال، سالسیارینی و همکاران (Salciarini et al., ۲۰۰۶) در ایتالیای مرکزی، با استفاده از برنامهٔ تریگرز زمین‌لغزش‌های کم عمق را مدل‌سازی کرده و اثر کمبود داده‌های ورودی نرم‌افزار که شامل داده‌های مربوط به ویژگی‌های مصالح دامنه و سطح اولیه آب زیرزمینی بوده را بر توزیع ناپایداری و ضرایب ایمنی در منطقه بررسی کردند. به همین منظور از دسته داده‌های ورودی مختلفی استفاده نمودند و نتایج نهایی حاصل از هر دسته داده را با نقشه زمین‌لغزش‌ها (Inventory Map) مقایسه نمودند. نتایج حاصل از مقایسه نشان داد که تا ۸۰ درصد انطباق بین نقشه موجود و نتایج حاصل از برنامهٔ تریگرز وجود داشته و بنابراین منبع قابل اعتمادی برای استفاده می‌باشد. این مطالعات نشان داد که این نرم‌افزار جهت تهیه نقشه‌های احتمال وقوع زمین‌لغزش‌های کم‌عمق و یا پیش‌بینی زمین‌لغزش‌های ناشی از بارندگی قابل استفاده بوده و حتی در نواحی که داده‌های ژئوتکنیکی و هیدروژئولوژیکی موجود نمی‌باشد هم کاربردی است (Gioia et al., ۳۰۱۳). در مطالعه‌ای دیگر پارک و همکاران (Park et al., ۲۰۱۳) از این نرم‌افزار جهت پیش‌بینی جریان‌های واریزه‌ای استفاده کردند. درواقع از ماژول‌های مسیریابی نرم‌افزار برای پیش‌بینی مسیرهای احتمالی جریان‌های واریزه‌ای به خصوص در مناطقی که ویژگی‌های مصالح و نرخ فرسایش قابل دستیابی نبود استفاده شد. اسکیلیرو و همکاران (Schiliro et al., ۲۰۱۵) نیز منطقه‌ای در شمال شرقی سیسیلی در ایتالیا را از نظر پایداری دامنه‌ها و احتمال وقوع زمین‌لغزش‌های کم‌عمق با استفاده از برنامهٔ تریگرز بررسی کردند. نتایج تحقیق در این منطقه نشان داد که حتی بارش‌های کوتاه مدت (بین ۱ تا ۳ ساعت) با دوره بازگشت کوتاه (حدود ۱۰ تا ۲۰ سال) می‌توانند سبب ایجاد ناپایداری در دامنه‌ها شوند.

آلویئولی و همکاران (Alvioli et al., ۲۰۱۸) اثر تغییرات اقلیم بر ناپایداری دامنه‌ها و به طور خاص تغییرات شدت و مدت بارش و اثر آن بر رخداد زمین‌لغزش‌ها را بررسی کردند. بدین منظور از نرم‌افزار TRIGRS v ۲،۱ جهت پایش پایداری دامنه‌ها استفاده نمودند. نتایج بررسی آنها نشان داد که اگرچه آستانه بارش برای رخداد زمین‌لغزش در آینده تغییر خواهد کرد، توزیع نواحی مستعد زمین‌لغزش بدون تغییر باقی خواهد ماند. در مطالعه‌ای دیگر ویرا و همکاران (Vieira et al., ۲۰۱۸) عملکرد دو برنامهٔ TRIGRS و SHALSTAB را برای پیش‌بینی زمین‌لغزش‌های کم‌عمق با در نظر گرفتن پارامترهای مکانیکی و ضخامت خاک متفاوت، مقایسه کردند. در مطالعهٔ آنها عملکرد هر دو مدل با مقایسه نتایج آن‌ها با نقشه‌های خطر سنجیده شده و هر دو در پیش‌بینی زمین‌لغزش‌های کم‌عمق کارآمد شمرده شدند.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1402.10.2.2.7]
[DOI: 10.61186/jsaeh.10.2.21]

در منطقه جنوب شرقی نروژ نیز از نرم‌افزار تریگرز جهت پایش زمین‌لغزش‌های کم‌عمق استفاده شده و سعی شد تا لغزش‌های کم‌عمق تحریک شده با باران در دامنه‌هایی با فرآیندهای هیدرولوژیکی متفاوت مانند ذوب برف پیش‌بینی شوند. نتایج نشان داد که نرم‌افزار قادر است زمین‌لغزش‌های مربوط به سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۳ را در منطقه به درستی شناسایی کند و باوجود کاهش شدت بارش‌ها در انتهای سال ۲۰۱۳، میزان ناپایداری دامنه‌ها در منطقه نسبت به سال ۲۰۱۱ افزایش یافته است. هم‌چنین میزان حساسیت نرم‌افزار به پارامترهای ورودی نیز بررسی شده و مشخص شد پارامترهای مکانیکی خاک و ضخامت خاک بیشترین تاثیر را بر روی شرایط پایداری دامنه‌ها دارند (Schiliro et al., ۲۰۲۱).

مطالعات دیگری در منطقه کالابریا، در جنوب ایتالیا، نشان داد که می‌توان از پارامترهای فیزیکی و مکانیکی که در تحقیقات پیشین برای خاک ارائه شده است به عنوان ورودی‌های نرم‌افزار استفاده نمود و طبق نتایج اولیه حاصل از نرم‌افزار، مکان‌های مناسب برای مطالعات دقیق‌تر محلی و نمونه‌برداری را مشخص نمود. سپس با توجه به نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی بر روی نمونه‌ها، ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک به دقت تعیین شده و این نتایج به عنوان داده‌های ورودی جدید به نرم‌افزار وارد شوند تا نتایجی با دقت بالاتر بدست آید (Ciurleo et al., ۲۰۲۲).

در مطالعهٔ حاضر نیز تلاش شده است که با استفاده از تجارب به دست‌آمده از مطالعهٔ زمین‌لغزش‌های پس از بارندگی در حوضهٔ بابل‌رود (به‌ویژه رخداد اسفند ۱۳۹۷-فروردین ۱۳۹۸) و با بهره‌گیری از قابلیت‌های برنامه تریگرز به بررسی اثر بارش بر ضریب ایمنی پایداری دامنه‌ها در این حوضه پرداخته شود و بارندگی‌هایی که می‌توانند محرک وقوع لغزش‌های متعدد در دامنه‌های طبیعی شوند (به‌ویژه لغزش‌های کم‌عمق و جریان‌های واریزه‌ای-گِلی متعاقب آنها)، شناسایی شوند.

هدف اصلی از انجام این مطالعه، تهیهٔ نقشه‌های توزیع ضریب ایمنی است که نقشه‌هایی کاربردی از دیدگاه پیش‌بینی پایداری دامنه‌ها به هنگام وقوع بارندگی محسوب می‌شوند. با استفاده از این نقشه‌ها می‌توان توزیع مکانی زمین‌لغزش‌های ناشی از بارندگی (لغزش‌های کم‌عمق و جریان‌های واریزه‌ای-گِلی) و زمان وقوع آنها را با توجه به میزان و شدت بارندگی پیش‌بینی نمود.

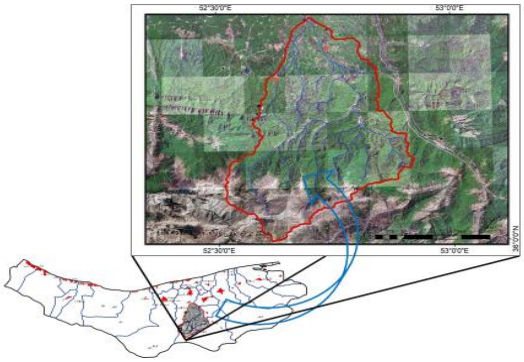
لازم به توضیح است که در اغلب مطالعات مربوط به پهنه‌بندی استعداد زمین‌لغزش‌ها در مقیاس ناحیه‌ای توجه کافی به مکانیسم زمین‌لغزش‌ها صورت نمی‌گیرد و روش‌های موجود از این نظر دارای نقص هستند. در این پژوهش ضمن در نظر گرفتن مکانیسم وقوع زمین‌لغزش‌ها و کلیهٔ عوامل مؤثر در وقوع آنها، لغزش‌های کم‌عمق ناشی از بارندگی به طور کامل شبیه‌سازی شده و مدل مفهومی کاملی برای تهیه نقشه استعداد اینگونه ناپایداری‌ها در مقیاس ناحیه‌ای مورد استفاده قرار گرفته است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1402.10.2.2.7]
[DOI: 10.61186/jsaeh.10.2.21]

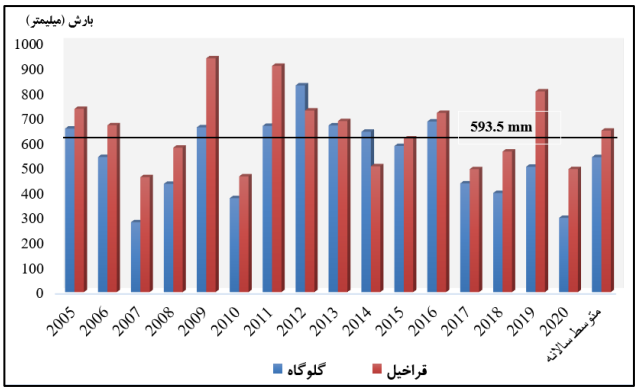
داده ها و روش کار

- **قلمرو جغرافیایی مورد مطالعه**

حوضهٔ آبخیز بابل رود به مساحت ۹۲۳.۳ کیلومتر مربع در استان مازندران و دردامنه شمالی رشته کوه‌های البرز واقع شده است و بخشی از حوضهٔ آبریز بزرگتر هراز- قره سو محسوب می‌شود (شکل ۱). از نظر توپوگرافی اغلب بخش‌های این حوضه، به ویژه بخش‌های جنوبی آن کوهستانی با شیب های تند است که به سمت شمال و دشت ساحلی خزر به تدریج از ارتفاع و شیب دامنه‌ها کاسته می‌شود. حداقل و حداکثر ارتفاع این حوضه به ترتیب ۱۴ و ۳۶۹۳ متر می‌باشد. این حوضه از دیدگاه اقلیمی، منطقه‌ای سرد و مرطوب با میانگین بارندگی سالیانه بیش از ۵۹۳/۳ میلیمتر می‌باشد (شکل ۲). فصل پاییز با حدود ۳۰ درصد از بارندگی کل در هر یک از ایستگاه‌های باران‌سنجی معرفی شده در شکل ۲، مرطوبترین فصل و تابستان و بهار نیز با داشتن حدود ۲۰ درصد از کل بارندگی سالیانه در هر یک از ایستگاه های معرفی شده خشکترین فصول سال در این منطقه می‌باشند. پوشش گیاهی این حوضه عمدتاً از نوع جنگلی است به‌گونه‌ای که بیشتر از ۷۶/۴ درصد مساحت حوضه توسط جنگل پوشیده شده است (شکل ۳). بخش شمالی حوضه، جایی که شیب زمین کمتر است، زمین‌های کشاورزی و باغات گسترش زیادی دارند.

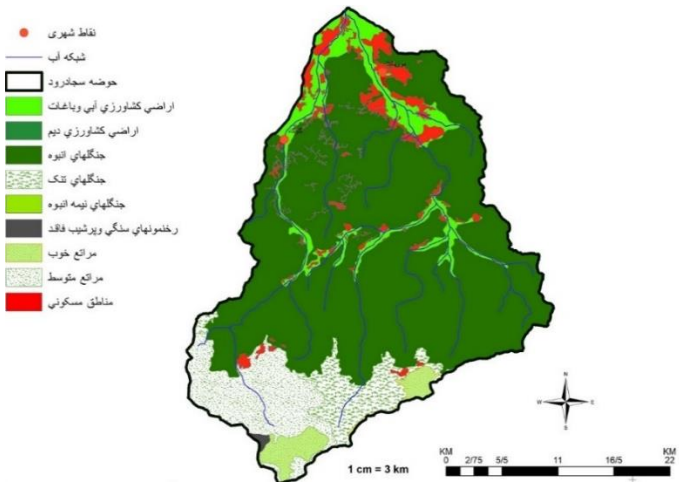


شکل ۱- موقعیت حوضهٔ آبخیز بابل رود بر روی تصویر ماهواره‌ای منطقه



شکل ۲- نمودار متوسط بارندگی سالیانه در فاصله سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۰ بر اساس داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیک گلوگاه و قراخیل

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1402.10.2.2.7]
[DOI: 10.61186/jsaeh.10.2.21]

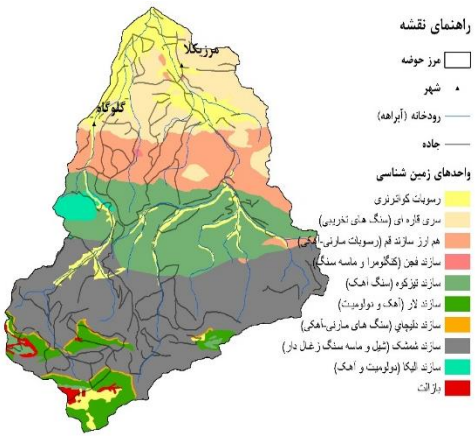


شکل ۳- نقشهٔ پوشش گیاهی و کاربری زمین در حوضهٔ آبخیز بابل رود

حوضه بابل رود از دیدگاه زمین‌شناسی در دامنه شمالی زون البرز مرکزی واقع شده است و شامل واحدهای چینه‌شناسی مختلفی از تریاس بالایی-ژوراسیک تا عهد حاضر می‌باشد که در فرهنگ چینه‌شناسی البرز شامل سازندهای شمشک، دلیچای، لار، تیزکوه، ولکانیک‌های کرتاسه، سنگ‌های آهکی و آهک مارنی کرتاسه بالایی، فجن، زیارت، معادل قم، معادل قرمز بالایی، سری‌های قاره‌ای و نهشته‌های کواترنری می‌شوند. همانطور که ملاحظه می‌شود اغلب این واحدها (به استثنای بخش کوچکی از ولکانیک‌های واقع در حوضه) از نوع سنگ‌های رسوبی بوده و از نظر سنگ‌شناسی عمدتاً از ۱) شیل و ماسه‌سنگ‌های زغال‌دار، ۲) مارن، گل‌سنگ، سیلتستون‌های و ماسه‌سنگ‌های ضعیف و ۳) سنگ‌های آهکی و دولومیتی و آهک مارنی، تشکیل شده‌اند. این سنگ‌ها نسبت به پدیدهٔ هوازدگی حساسیت متفاوتی داشته و بسته به ترکیب کانی‌شناسی آنها، نوع و تراکم پوشش گیاهی، میزان شیب دامنه و نوع غالب هوازدگی (با توجه به اقلیم منطقه) خاک‌هایی با ضخامت و ویژگی‌های ژئوتکنیکی متفاوت بر روی آنها گسترش یافته است. حضور و ویژگی‌های مختلف این خاک‌ها عوامل اصلی وقوع زمین‌لغزش‌های کم‌عمق ناشی از بارندگی محسوب می‌شوند. شکل ۴ نقشهٔ زمین‌شناسی حوضهٔ آبخیز مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

همانطور که اشاره گردید، این حوضه به دلایل مختلف از جمله شرایط زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی مستعد (گسترش وسیع خاک‌های سست ناشی از هوازدگی سنگ بستر رسی)، توپوگرافی کوهستانی و وقوع بارش‌های طولانی مدت و شدید، منطقه‌ای مستعد از دیدگاه وقوع زمین‌لغزش‌های ناشی از بارندگی محسوب می‌شود. در بارندگی رخ داده در اواخر اسفند ۱۳۹۷، در حوضهٔ آبخیز بابل رود تعداد زیادی لغزش کم‌عمق با ابعاد کوچک تا متوسط (و متعاقب آن جریان‌های گلی-واریزه‌ای) به‌وقوع پیوست که خسارات قابل‌توجهی را برجا گذاشت. نمونه‌هایی از این زمین‌لغزش‌ها و خسارات ناشی از رخداد آنها در شکل ۵ نشان داده شده است. همانطور که در تصاویر نیز قابل مشاهده است، تخریب باغ‌ها، راه‌های ارتباطی روستایی و منازل روستایی از جمله این خسارت‌ها بوده است. اغلب این زمین‌لغزش‌ها نسبت عمق به طول (d/L) کمی داشته و فقط واحدهای خاکی روی سنگ بستر را تحت تأثیر قرار داده‌اند و در زمرهٔ لغزش‌های کم‌عمق قابل طبقه‌بندی هستند.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1402.10.2.2.7]
[DOI: 10.61186/jsaeh.10.2.21]



شکل ۴- نقشهٔ زمین‌شناسی حوضهٔ بابل رود؛ بر اساس نقشهٔ زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ قائمشهر (سازمان زمین‌شناسی کشور)

روستای ارکا

روستای ارکا

روستای ولوکش

روستای ازارسی

روستای کاردگرکلا

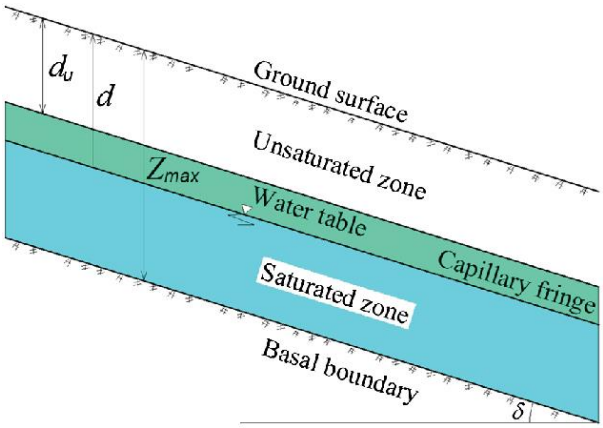
روستای رودبار

شکل ۵- نمونه‌هایی از زمین‌لغزش‌های رخ داده در بارندگی‌های اواخر اسفند ۱۳۹۷ در حوضه بابل رود

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1402.10.2.2.7]
[DOI: 10.61186/jsaeh.10.2.21]

- **تشریح نظری مدل مفهومی**

در این مطالعه، منظور از زمین‌لغزش‌های کم عمق، لغزش‌هایی هستند که نسبت عمق به طول کمی داشته و در مصالح سست سطحی (پوشش خاک روی سنگ بستر) و در امتداد سطوحی به موازات سطح سنگ بستر رخ می‌دهند (شکل ۶). این شکل از حرکات دامنه‌ای، پس از بارندگی‌های مداوم و شدید، بسته به ویژگی‌های توپوگرافی حوضه و شرایط ژئوتکنیکی مصالح تشکیل‌دهندهٔ دامنه‌ها، ممکن است بیشتر از سایر انواع حرکات دامنه‌ای رخ دهند. در این نوع زمین‌لغزش‌ها فقط بخش سطحی زمین در عمقی کمتر از عمق سنگ بستر دچار گسیختگی می‌شود. این مصالح جابجا شده در ادامه می‌توانند در تشکیل جریان‌های گلی و واریزه‌ای بزرگ نیز مشارکت داشته باشند. در اینگونه ناپایداری‌ها تعیین ضریب ایمنی پایداری و تخمین عمق گسیختگی در پوشش سطحی تا حدی دشوار است، اما مطالعات انجام شده گواه آن است که ضریب ایمنی و عمق گسیختگی ارتباط مشخصی با پارامترهایی مانند فشار آب منفذی و میزان رطوبت خاک دارند و چون رطوبت خاک و فشار آب منفذی به شدت و مدت بارندگی و نفوذ آب باران و رواناب حاصله در خاک و همینطور جریان آب نفوذی در زون غیر اشباع بستگی دارد، تعیین ضریب ایمنی تا حدی پیچیده می‌گردد. بنابراین لازم است تئوری‌های مختلف مانند نحوهٔ نفوذ آب باران به داخل زمین و جریان زیرسطحی آب نفوذی، مسیریابی رواناب و پایداری شیب با هم ترکیب شوند تا بتوان به راه حلی مناسب و قابل قبول برای بررسی اثرات بارش‌ها بر پایداری دامنه‌های طبیعی در مقیاس ناحیه‌ای و تعیین ضریب اطمینان پایداری دامنه‌ها در یک حوضهٔ آبخیز وسیع با شرایط زمین‌شناسی، مورفولوژیکی و هیدروژئولوژیکی متنوع، دست یافت.



شکل ۶- مدل هندسی و هیدروژئولوژیکی مورد استفاده در تحلیل پایداری دامنه (Baum et al., ۲۰۰۸)

با فرض این که سطح زمین موازی با سطح بالایی سنگ بستر است، می‌توان برای تحلیل پایداری لغزش‌های کم‌عمق از مدل شیب بی‌نهایت استفاده نمود که در آن سطح گسیختگی نیز موازی با سطح زمین و سنگ بستر فرض می شود. در این حالت، ضریب ایمنی پایداری دامنه از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$F_S(Z,t)=\frac{\tan\phi'}{\tan\delta}+\frac{c'-\psi(Z,t)\gamma_W\tan\phi'}{\gamma_S Z\sin\delta\cos\delta}$$ رابطه (۱)

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1402.10.2.2.7]
[DOI: 10.61186/jsaeh.10.2.21]

که در آن، $F_s(Z, t)$ ضریب ایمنی در عمق Z و زمان t بعد از شروع بارندگی، C' و ϕ' پارامترهای مقاومت برشی خاک، δ شیب زمین و درصد وزن مخصوص خاک است. پارامتر $\psi(Z, t)$ نیز فشار آب منفذی در عمق Z و زمان t بعد از شروع بارندگی است. تعیین فشار آب منفذی و تغییرات آن در هر دامنه، مستلزم درک چگونگی نفوذ آب باران و جریان آب در داخل زمین است. این موضوع با معادله ریچاردز توصیف می‌شود (Richards, ۱۹۳۱). معادلهٔ ریچاردز که یک معادلهٔ دیفرانسیلِ جزئیِ غیرخطی است، راه حل تحلیلی فرم بسته ندارد و برای حل آن از راه‌حل‌های تقریبی، در شرایط اشباع (Iverson, ۲۰۰۰) و غیراشباع (Savage et al., ۲۰۰۳, ۲۰۰٤; Srivastava and Yeh, ۱۹۹۱) استفاده می شود.

برای اینکه رویکرد مدل‌سازی برای دامنه وسیع‌تری از شرایط رطوبتی اولیه خاک قابل اجرا باشد، باوم و همکاران (Baum et al., ۲۰۰۸) یک راه‌حل تحلیلی برای جریان آب زیرزمینی در خاک غیراشباع نیز توسعه داده‌اند. این گزینه، خاک را به عنوان یک سیستم دو لایه شامل: ۱) منطقه اشباع شده در زیر سطح آب که توسط یک زون مویینه پوشانده شده است و ۲) منطقه‌ای غیراشباع که تا سطح زمین گسترش می‌یابد، در نظر می‌گیرد. منطقه غیراشباع بخشی از آبی را که به سطح زمین نفوذ می کند جذب می کند و آب باقیمانده از زون غیراشباع عبور می کند و در پایین ناحیه غیراشباع بالای سطح آب اولیه تجمع می یابد. در این مدل، ناحیه غیراشباع مانند فیلتری عمل می‌کند که نفوذ سطحی را در عمق تضعیف کرده و به تاخیر می‌اندازد.

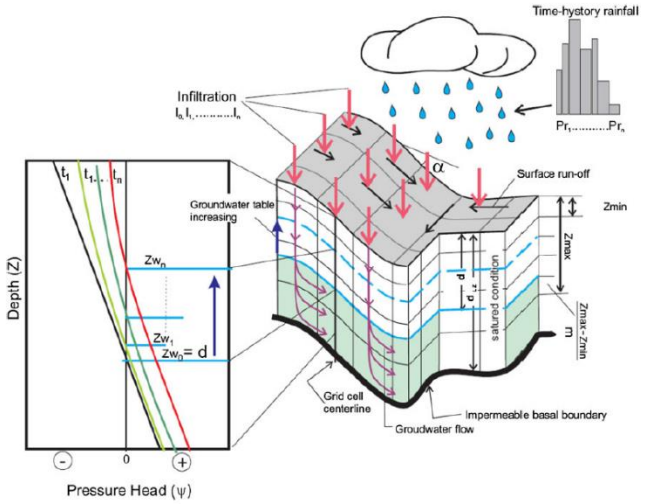
- **برنامهٔ تریگرز**

برنامهٔ تریگرز برنامه‌ای کاربردی برای تحلیل پایداری شیب‌ها در مقیاس ناحیه‌ای است. این برنامه به زبان فرترن و توسط باوم و همکاران (Baum et al., ۲۰۰۲, ۲۰۰۸) در سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده آمریکا تهیه شده است. تریگرز در دو دههٔ گذشته در کشورهای متعددی برای تجزیه و تحلیل زمین لغزش‌ها مورد استفاده قرار گرفته است (Baum et al., ۲۰۱۰; Liao et al., ۲۰۱۱; Park et al., ۲۰۱۳; Viet et al., ۲۰۱۷; Liu and Wu, ۲۰۰۸).

در برنامهٔ تریگرز چند تئوری مختلف شامل: ۱) نفوذ آب باران به داخل زمین، ۲) جریان زیرسطحی آب نفوذی، ۳) مسیریابی رواناب و ۴) پایداری شیب (تحلیل شیب بی‌نهایت) با هم ترکیب می‌شوند تا اثرات بارش‌ها بر پایداری شیب‌ها در مقیاس ناحیه‌ای مورد ارزیابی قرار گیرد (شکل ۷).

این برنامه که برای اولین بار در سال ۲۰۰۲ منتشر شد (Baum et al., ۲۰۰۲)، بر اساس روشی استوار است که توسط آیورسون (۲۰۰۰) با به کارگیری تاریخچه‌های پیچیده بارش و در نظر گرفتن یک مرز غیرقابل نفوذ در عمق محدود (شکل‌های ۶ و ۷) و یک روش ساده مسیریابی رواناب، ارائه شده است. در آخرین نسخه (نسخه ۲)، باوم و همکاران (Baum et al., ۲۰۰۸)، شکل یک بعدی معادله ریچاردز را برای شبیه سازی نفوذ آب به داخل زمین با استفاده از تبدیل مختصات توصیف شده توسط آیورسون (Iverson, ۲۰۰۰) اصلاح کردند. یک راه حل تحلیلی از این معادله توسط سریواتساوا و یه (Srivastava and Yeh, ۱۹۹۱) برای بررسی نفوذ آب باران در یک لایه سطحی نیمه‌اشباع بالای سطح آب ارائه شد.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1402.10.2.2.7]
[DOI: 10.61186/jsaeh.10.2.21]



شکل ۷- اجزای مختلف مدل تحلیل پایداری شیب در برنامه تریگرز (Grelle et al., ۲۰۱٤)

برنامهٔ تریگرز می‌تواند برای مدل‌سازی و پیش‌بینی زمان‌بندی و توزیع مکانی زمین‌لغزش‌های کم‌عمق و ناشی از بارندگی در یک منطقه یا حوضهٔ آبخیز وسیع استفاده شود (Baum et al., ۲۰۰۲, ۲۰۰۸, ۲۰۱۰). در نتیجه، این برنامه یک برنامهٔ مبتنی بر شبکه است و محاسبات برای هر سلول به صورت جداگانه صورت می‌گیرد. مجموعهٔ سلول‌های چهارگوش که ابعاد منظم و ثابتی در کل حوضه دارند، شبکهٔ مورد مطالعه را تشکیل می‌دهند. در واقع، محدودهٔ جغرافیایی حوضهٔ مورد مطالعه، توسط آرایه‌ای از سلول‌های منظم، نمایش داده می‌شوند که با سلول‌های مدل رقومی ارتفاعی (DEM) که برای توصیف توپوگرافی منطقه مورد مطالعه، استفاده می شوند، منطبق است.

در درون هر سلول، زمین به‌عنوان یک سیستم دولایه مدل‌سازی می‌شود که شامل یک منطقه اشباع در پایین با زون موئینگی بالای سطح آب است که در زیر یک منطقه غیراشباع که تا سطح زمین گسترش می‌یابد قرار گرفته است (شکل‌های ۶ و ۷). سطح ایستابی و سطح لغزش (فرضی) مسطح و موازی با سطح توپوگرافی هستند.

این نرم‌افزار شرایط پایداری تمامی سلول‌های منفرد را در یک حوضه وسیع محاسبه نموده و نفوذ آب در خاک را با بهره‌گیری از روش پیشنهادی آیورسون (Iverson, ۲۰۰۰)، برای جریان قائم یک بعدی در مصالح همسانگرد و همگن و برای شرایط اشباع و غیراشباع، مدل می کند. در برنامه، نیروهای وارد بر هر سلول در مرکز جرم هر سلول متعادل می‌شوند و تمام تعاملات با سلول‌های همسایه نادیده گرفته می‌شوند.

- **داده‌های مورد نیاز**

مدل‌سازی لغزش‌های کم‌عمقِ ناشی از بارندگی، با اتخاذ رویکرد شیب بی‌نهایت و در مقیاس ناحیه‌ای، نیازمند داده‌هایی است (جدول ۱) که برخی در طول زمان متغیر و برخی ثابت هستند. پارامترهای ثابت شامل خواص ژئوتکنیکی و هیدرولوژیکی مصالح تشکیل‌دهنده دامنه (دانسیته، چسبندگی، زاویه اصطکاک، محتوای آب، هدایت هیدرولیکی اشباع) و ویژگی‌های هندسی دامنه (شیب دامنه و صفحه لغزش و عمق سطح گسیختگی) می‌شوند. ثابت بودن این پارامترها در طول زمان از فرض‌های

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1402.10.2.2.7]
[DOI: 10.61186/jsaeh.10.2.21]

اصلی مدل است. اصلی‌ترین پارامتر وابسته به زمان، فشار آب منفذی است که در بخش غیراشباع خاک تابعی از نوسانات درصد رطوبت و در بخش اشباع تابع نوسانات تراز سطح آب زیرزمینی است (Freeze and Cherry, ۱۹۷۹).

همانطور که اشاره شد، برنامه تریگرز یک برنامهٔ مبتنی بر شبکه‌ای از سلول‌های منظم است و اغلب داده‌های ورودی مورد نیاز آن (مانند ارتفاع و شیب، نوع و عمق خاک، عمق اولیهٔ آب زیرزمینی) لازم است در قالب فایل‌های متنی آماده شوند که امکان اختصاص مقادیر به هر یک از سلول‌ها در آن وجود داشته باشد. این فایل‌های متنی بعد از تهیه نقشه‌های رستری در نرم‌افزارهای مبتنی بر GIS، با استفاده از قابلیت‌های این نرم‌افزارها قابل آماده‌سازی هستند.

جدول ۱- پارامترهای ورودی نرم‌افزار TRIGRS

پارامترهای زمین‌شناسی	پارامترهای زمین‌ریخت‌شناسی	پارامترهای مکانیکی خاک	پارامترهای هیدروژئولوژیکی	پارمترهای بارش
عمق خاک (Z_{max}) عمق سطح آب زیرزمینی	مدل ارتفاع رقومی (DEM) شیب جهت جریان	چسبندگی (C) زاویه اصطکاک داخلی (φ) وزن واحد حجم خاک (γ_s)	ضریب انتشار هیدرولیکی (D_0) هدایت هیدرولیکی اشباع (K_s) رطوبت حجمی اشباع (θ_s) رطوبت حجمی باقی‌مانده (θ_r) نرخ نفوذ اولیه (IZ) عکس ارتفاع منطقه موئینه (α)	شدت بارش مدت بارش

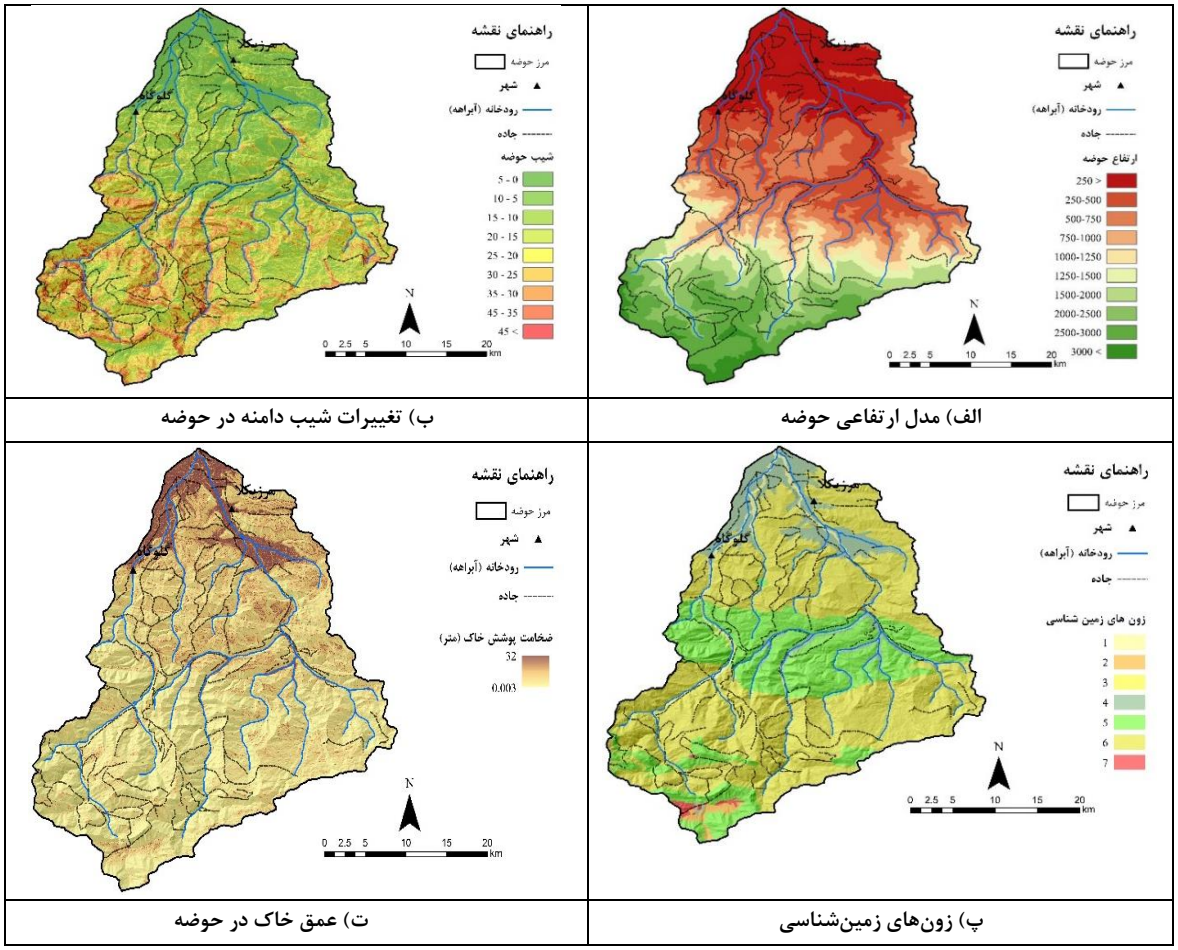
الف- مدل ارتفاعی رقومی

مهمترین داده رقومی مورد نیاز در این پژوهش، مدل ارتفاعی رقومی منطقه است که به عنوان دادهٔ اولیه و نقشهٔ مبنا برای تهیه سایر نقشه‌های عوامل مورد استفاده قرار می‌گیرد و به همین دلیل ضروری است از دقت و وضوح کافی برخوردار باشد. در واقع، شبکهٔ سلول‌های این نقشه، به عنوان مبنای تفکیک سلول‌های سایر نقشه‌های عوامل از نظر موقعیت و ابعاد می‌باشد. در این پژوهش، از مدل ارتفاعی رقومی که ابعاد سلول‌های آن ۱۲/۵ متر بوده و از وبسایت ASF دانلود شده است، استفاده شده است. در شکل ۸-الف مدل ارتفاعی رقومی حوضه مورد مطالعه ارائه شده است.

ب- شیب حوضه

یکی از پارامترهای مؤثر در پایداری هر سلول در مدل پایداری شیب بی‌نهایت که برنامهٔ تریگرز بر مبنای آن بنا نهاده شده است، زاویهٔ α یا شیب سلول است (شکل ۷). پارامتر شیب سطح زمین در هر یک از سلول‌های تفکیک شده در مدل ارتفاعی رقومی با استفاده از نرم‌افزارهای مبتنی بر GIS قابل تعیین بوده و نقشه رستری این پارامتر با رده‌بندی مورد نیاز و دلخواه قابل تهیه می‌باشد (شکل ۸-ب).

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1402.10.2.2.7]
[DOI: 10.61186/jsaeh.10.2.21]



الف) مدل ارتفاعی حوضه

ب) تغییرات شیب دامنه در حوضه

پ) زون‌های زمین‌شناسی

ت) عمق خاک در حوضه

شکل ۸- نقشه‌های عوامل مختلف که فایل متنی آنها داده‌های ورودی برنامهٔ تریگرز هستند

پ- رواناب و نحوه توزیع آن در حوضه

بسته به نفوذپذیری خاک سطحی، تمام یا بخشی از آب باران به داخل هر سلول نفوذ می‌کند. در صورتی که نفوذپذیری خاک کمتر از نرخ بارش و رواناب دریافتی از سلول‌های مجاور باشد، بخشی از این آب به صورت رواناب درخواهد آمد و در جهت شیب دامنه و به سمت سلول‌های مجاور که در پایین‌دست قرار دارند، جریان خواهند یافت. برای تعیین نحوه توزیع رواناب و مشخص نمودن سلول‌های مجاور و سهم هر یک از آنها برای دریافت رواناب ایجاد شده، مدل‌های مختلفی توسط محققین مختلف پیشنهاد شده است. در این پژوهش از روش D-infinity که توسط تاربوتون (Tarboton, ۱۹۹۷) معرفی شده است، برای تعیین توزیع رواناب در حوضه استفاده شده است. در این روش که از نظر فیزیکی واقعی‌تر به نظر می‌رسد، رواناب اضافی به سمت یک یا دو سلول مجاور که در جهت بیشترین شیب قرار دارند، جریان می‌یابد. سهم سلول‌های مجاور از دریافت رواناب به میزان شیب میان سلول اصلی و هر یک از دو سلول مجاور بستگی دارد و طبیعتاً سلولی که در جهت شیب بیشتر قرار دارد، رواناب بیشتری دریافت می‌کند.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1402.10.2.2.7]
[DOI: 10.61186/jsaeh.10.2.21]

در این پژوهش، از برنامهٔ توپوایندکس (Topoindex) که توسط سازمان زمین‌شناسی آمریکا طراحی و همراه با برنامهٔ تریگرز منتشر شده است، به منظور مشخص نمودن نحوه توزیع رواناب در حوضه استفاده شده است. این برنامه با استفاده از فایل های متنی مدل ارتفاعی و شیب حوضه، به عنوان داده‌های ورودی، فایل‌های متنی ویژه‌ای را که به عنوان فایل ورودی مورد نیاز در برنامهٔ تریگرز به‌کار می‌روند، تولید می‌نماید.

ت- عمق آب زیرزمینی

عمق آب زیرزمینی نقش اساسی در پایداری شیب‌ها و به ویژه در مدل پایداری به کارگرفته شده در برنامه تریگرز دارد. توزیع اولیه رطوبت در خاک و موقعیت زون‌های اشباع و نیمه اشباع خاک به موقعیت قرارگیری سطح آب وابسته است. در این پژوهش برای تخمین عمق آب زیرزمینی توجه خاصی به شرایط کلی هیدروژئولوژیکی منطقه شده است. عمق سطح آب زیرزمینی به شیب دامنه، ضخامت خاک بر روی سنگ بستر و نفوذپذیری سنگ بستر بستگی دارد. بنابراین، در این پژوهش با بهره‌گیری از برخی معیارهای آب‌زمین‌شناسی تلاش شده است تخمینی از عمق آب زیرزمینی در منطقه به دست آید. به عنوان مثال، در شیب‌های تند، جایی که ضخامت خاک کمتر از ۳ متر است و همچنین در دامنه‌هایی که سنگ کف متشکل از آهک های متخلخل است سطح آب پایین‌تر از سنگ بستر در نظر گرفته شده است و یا در زمین‌های کشاورزی، جایی که آبیاری غرقابی است، سطح آب بسیار نزدیک به سطح زمین در نظر گرفته شده است (کمتر از ۱ متر).

روشن است که عمق آب زیرزمینی در طول سال با تغییرات میزان بارش، نوسانات زیادی دارد. از آنجا که در این پژوهش اثر بالا آمدن سطح آب زیرزمینی در اثر بارندگی‌های شدید و مداوم به طور جداگانه مورد بررسی قرار خواهد گرفت، تخمین موقعیت سطح آب زیرزمینی در مقدار کمینه مد نظر قرار گرفته است.

ث- زون‌های زمین‌شناسی و پارامترهای ژئوتکنیکی خاک‌ها

یکی دیگر از پارامترهای ورودی مورد نیاز در این مطالعه، گسترش انواع واحدهای خاکی در منطقه و ویژگی‌های ژئوتکنیکی این خاک‌ها می‌باشد. نحوه شکل‌گیری و گسترش واحدهای خاکی در یک منطقه به شرایط زمین‌شناسی حوضه و به ویژه سنگ بستر و فرایندهای هوازدگی، فرسایش و انتقال و رسوب مواد حاصل از هوازدگی وابسته است. در حوضه مورد مطالعه انواع خاک‌های برجا (حاصل از هوازدگی سنگ بستر)، نهشته‌های آبرفتی، رسوبات دشت سیلابی، پادگانه‌ها و مصالح لغزشی و واریزه‌ها گسترش دارند. مرز این واحدها از طریق بررسی‌های صحرایی، مطالعه نقشه‌های زمین‌شناسی و تصاویر ماهواره‌ای و با در نظر گرفتن شواهد توپوگرافی و ریخت‌شناسی تعیین و در نقشه زون‌های زمین‌شناسی که در واقع نشان‌دهنده گسترش انواع مصالح خاکی در حوضه است، ترسیم شده است (شکل ۸-پ).

ضروری است که برای هر یک از این زون‌ها و واحدهای خاکی از طریق مطالعات زمین‌شناسی مهندسی و با بهره‌گیری از نتایج مطالعات ژئوتکنیکی انجام شده قبلی در منطقه و قضاوت مهندسی، مقادیر تیپیک پارامترهای ژئوتکنیکی مشخص گردد. این پارامترها برای زون‌های شش‌گانهٔ شناسایی شده در حوضه تعیین و در جدول ۲ درج شده‌اند. لازم به توضیح است که در این مطالعه از نتایج عملیات ژئوتکنیک صورت گرفته در پروژه‌های قبلی نیز برای تدقیق و صحت‌سنجی پارامترهای ژئوتکنیکی در نظر گرفته شده برای واحدهای خاکی تفکیک شده استفاده شده است. نمونه‌ای از این مطالعات مربوط به طرح تثبیت

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1402.10.2.2.7]
[DOI: 10.61186/jsaeh.10.2.21]

روستاهای آسیب‌دیده از زمین‌لغزش در بارندگی‌های اسفند ۱۳۹۷ می‌باشد که به ویژه در دو روستای ازارسی و ارکا انجام شده است (شکل ۹).

در این مطالعه، نقش پوشش گیاهی نیز به عنوان عاملی تأثیرگذار در پتانسیل وقوع انواع زمین‌لغزش به طور غیرمستقیم در نظر گرفته شده است. معمولاً پوشش گیاهی از طریق اثرگذاری بر میزان نفوذپذیری و پارامترهای مقاومت برشی خاک می‌تواند در ضریب ایمنی پایداری و تغییرات آن حین بارندگی مؤثر باشد.

جدول ۲- مقادیر تیپیک پارامترهای ژئوتکنیکی در زون‌های پوشیده از خاک در منطقه مورد مطالعه

زون	نوع	مقادیر تیپیک پارامترهای ژئوتکنیکی					ویژگی‌های زمین‌شناسی
		دانه‌بندی	وزن واحد حجم (gr/cm^3)	چسبندگی (kPa)	زاویه اصطکاک (درجه)	نفوذپذیری (متربرثانیه)	
۱	آبرفت‌های جوان رودخانه‌ای	درشت‌دانه باریزدانهٔ اندک	۲/۱	< ۱۰	۴۰-۴۵	۱×۱۰^{-۶}	حاوی قطعات در حد قلوه‌سنگ و بزرگتر، گردشده
۲	تالوس و واریزه	درشت‌دانه	۲/۱	< ۱۰	۴۵-۵۰	۱×۱۰^{-۶}	حاوی قطعات در حد قلوه‌سنگ، تیزگوشه، دارای سیمان ضعیف
۳	پادگانه‌های آبرفتی جوان و قدیمی	درشت‌دانه با سیمان رسی-سیلتی ضعیف	۲/۱	۱۵-۲۰	۴۰-۴۵	۱×۱۰^{-۷}	دارای سیمان ضعیف تا متوسط
۴	زمین‌های کشاورزی	ریزدانه سیلتی همراه با ماسه	۱/۸	۱۵-۲۰	۲۰-۲۵	۱×۱۰^{-۷}	سرشار از مواد آلی، با ساختار به‌هم‌ریخته
۵	خاک برجا با سنگ بستر از جنس از سنگ‌های کربناته	رس و سیلت با درشت‌دانه اندک	۱/۹	۴۵-۵۰	۳۵-۴۰	۱×۱۰^{-۸}	حاوی کانی رسی فراوان، عمدتاً خاک‌های جنگلی حاوی مواد آلی، تسلیح خاک توسط ریشهٔ گیاهان
۶	خاک برجا با سنگ بستر متشکل از سنگ‌های رسی (شیل، گلسنگ، مارن و سیلتستون)	رس و سیلت با درشت‌دانه اندک	۱/۹	۵۰-۶۰	۳۰-۳۵	۱×۱۰^{-۸}	
۷	خاک برجا با سنگ بستر از جنس سنگ‌های آتشفشانی	رس و سیلت با درشت‌دانه اندک	۱/۹	۴۵-۵۰	۳۰-۳۵	۱×۱۰^{-۸}	

ج- ضخامت پوشش خاک بر روی سنگ بستر

همانطور که اشاره شد، در مدل‌سازی با برنامه تریگرز، هدف تعیین ضریب ایمنی در اعماق مختلف پوشش خاک روی سنگ بستر در امتداد صفحاتی موازی با شیب سطح زمین و سطح سنگ بستر می‌باشد. بنابراین لازم است ضخامت پوشش خاک برای سطح حوضه مشخص گردد. روش‌های مختلفی برای تهیه نقشه ضخامت خاک در یک حوضه وجود دارد (Dietrich et

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1402.10.2.2.7]
[DOI: 10.61186/jsaeh.10.2.21]

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.24237892.1402.10.2.2.7]

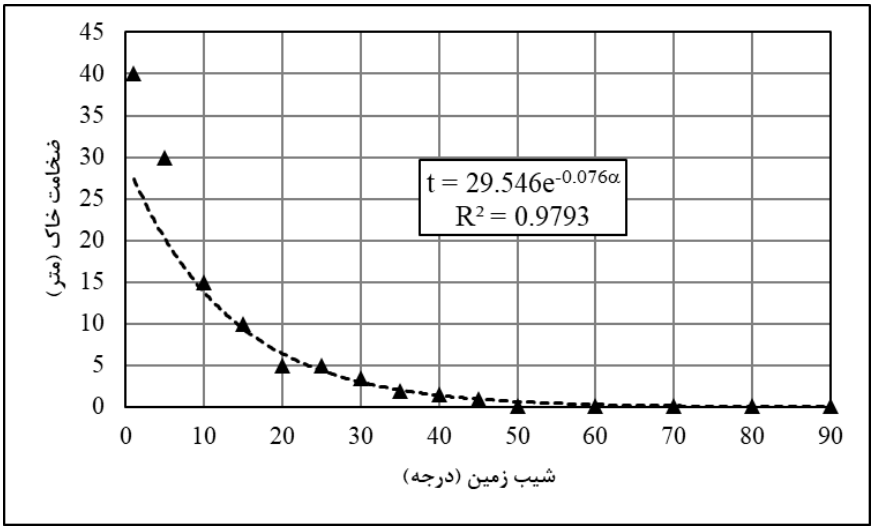
[DOI: 10.61186/jsaeh.10.2.21]

al., ۱۹۹۵; Saulnier et al., ۱۹۹۷; Delmonaco, ۲۰۰۳; Catani et al., ۲۰۱۰). یکی از این روش‌ها، توسعه روابط تجربی میان ضخامت خاک و پارامترهای مورفولوژیکی قابل اندازه‌گیری (مانند شیب زمین) است. مطالعات انجام شده در منطقه مورد مطالعه از طریق بررسی تعداد زیادی دامنه مختلف نشان داده است که می‌توان از رابطه ارائه شده در شکل۱۱ ضخامت خاک را به طور تقریبی با استفاده از شیب زمین به دست آورد. شکل ۱۰ برخی از دامنه‌های مورد بررسی قرار گرفته برای تعیین رابطه بین شیب زمین و ضخامت خاک را نشان می دهد. نقشه ضخامت خاک حوضه با همین روش در محیط GIS تهیه و در شکل ۸-ت ارائه شده است.

(الف) (ب) (ج) (د)

شکل ۹- نمونه‌ای از عملیات ژئوتکنیکی انجام شده در حوضهٔ آبخیز بابل رود برای مطالعات طرح تثبیت روستاهای آسیب‌دیده از زمین‌لغزش در بارندگی‌های اسفند ۱۳۹۷ در شهرستان بابل؛ الف و ب) حفر گمانه‌های ماشینی در روستای ازارسی؛ ج و د) حفر چاهک‌های دستی در روستای ارکا

شکل ۱۱- تصاویری از دامنه‌های طبیعی حوضهٔ مورد مطالعه



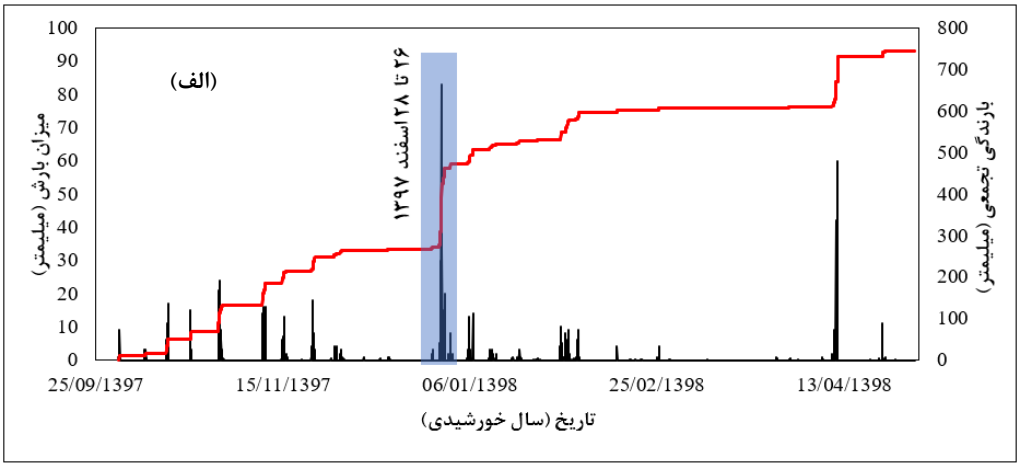
شکل ۱۰- رابطه بین شیب زمین و ضخامت خاک در حوضهٔ مورد مطالعه

چ- شدت و مدت بارش

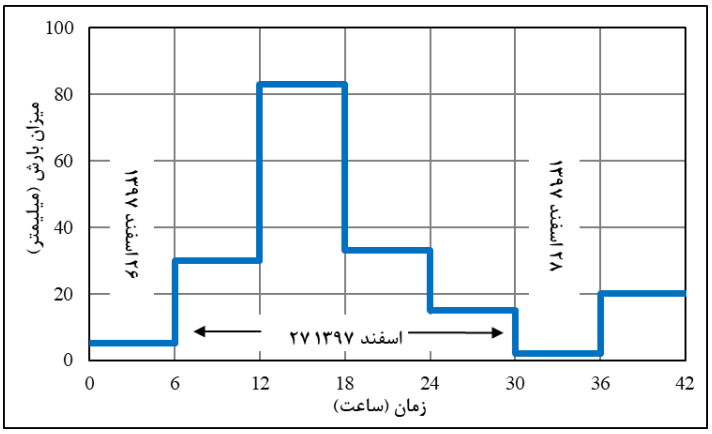
یکی دیگر از پارامترهایی که برای تعیین ضریب اطمینان پایداری دامنه‌ها لازم است مشخص باشد، بارندگی مبنایی است که پیش‌بینی می‌شود در حوضه رخ می‌دهد. شدت و مدت این بارندگی تعیین کنندهٔ نوسانات رطوبت خاک و فشار آب منفذی و در نتیجه مقاومت برشی خاک در طول مدت بارش است. وقتی آب باران به ناحیه غیراشباع خاک نفوذ می‌کند، مکش ماتریک و در نتیجه مقاومت برشی خاک کاهش می‌یابد. کاهش مکش ماتریک ممکن است مقاومت برشی خاک را به کمتر از مقاومت برشی بسیج شده در امتداد سطح لغزش بالقوه کاهش دهد که در این صورت دامنه ناپایدار شده و گسیختگی شیب رخ می‌دهد. بنابراین، روشن است که ضریب ایمنی پایداری دامنه در اعماق مختلف خاک در زمان‌های مختلف در طول بارندگی متفاوت بوده و در اولین زمانی که در یک عمق مشخص کمتر از یک باشد، گسیختگی رخ خواهد داد.

در این مطالعه، بارندگی رخ داده در تاریخ ۲۶ تا ۲۸ اسفند ۱۳۹۷ به عنوان بارندگی مبنا در تحلیل‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. شکل ۱۲-الف، بارش‌های ۶ ساعته ثبت شده در ایستگاه قراخیل را برای یک دورهٔ ۸ ماهه نشان می‌دهد. شکل ۱۲-ب نیز نوسانات ۶ ساعته و شدت بارش مربوط به بارندگیِ ۲۶ تا ۲۸ اسفند ۱۳۹۷ را در طی ۴۲ ساعت بارش نشان می‌دهد.

همانطور که قبلاً اشاره شد، در زمان رخداد این بارندگی شدید و نسبتاً طولانی تعدادی از دامنه‌های طبیعی در حوضهٔ مورد مطالعه ناپایدار شده و لغزش‌هایی با عمق کم در آنها به وقوع پیوست. خوشبختانه، از آنجا که در تعدادی از این لغزش‌ها که در مناطق روستایی رخ دادند، علاوه بر مشخص بودن زمان دقیق شروع حرکت، مطالعات دقیق ژئوتکنیک، ژئوفیزیک و زمین‌شناسی مهندسی، به منظور ارائهٔ طرح تثبیت دامنهٔ ناپایدار صورت گرفت، اطلاعات کافی برای سنجش اعتبار تحلیل‌ها نیز در دسترس می‌باشد.



[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1402.10.2.2.7]
[DOI: 10.61186/jsaeh.10.2.21]



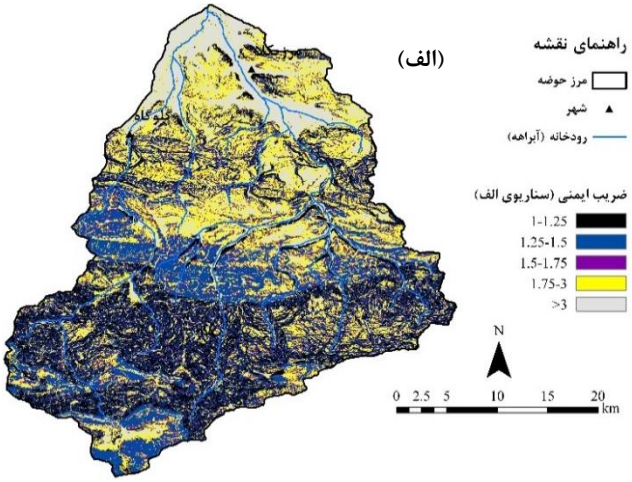
شکل ۱۲- الف) رخدادهای بارندگی در زمستان ۱۳۹۷ تا تابستان ۱۳۹۸ در حوضهٔ مورد مطالعه؛ ب) بارندگی رخداده در تاریخ ۲۶ تا ۲۸ اسفند ۱۳۹۷ (بر اساس آمار ثبت شده در ایستگاه قراخیل)

شرح و تفسیر نتایج

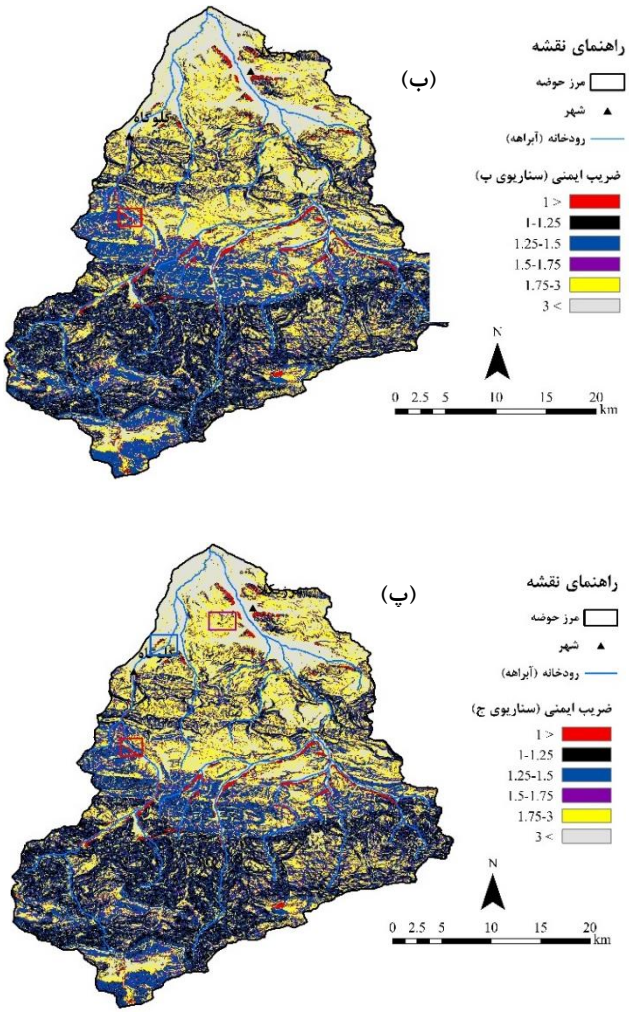
- **محاسبهٔ ضریب ایمنی پایداری دامنه‌ها**

بعد از تأمین اطلاعات مورد نیاز برای تحلیل پایداری هر یک از سلول‌های مجزا در قالب فایل‌های رستری و تبدیل این فایل‌ها به فایل‌های متنیِ سازگار با فرمت ورودی برنامهٔ تریگرز، پارامترهای زیر با اجرای برنامهٔ تریگرز برای هر سلول مجزا، بعد از گذشت زمان مد نظر از شروع بارندگی، محاسبه و در قالب فایل‌های متنی ذخیره می‌شوند:

- ضریب ایمنی حداقل؛
- عمقی که ضریب ایمنی حداقل در آن به وقوع پیوسته است؛
- فشار آب منفذی در عمقی که ضریب ایمنی حداقل در آن به وقوع پیوسته است.



[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1402.10.2.2.7]
[DOI: 10.61186/jsaeh.10.2.21]

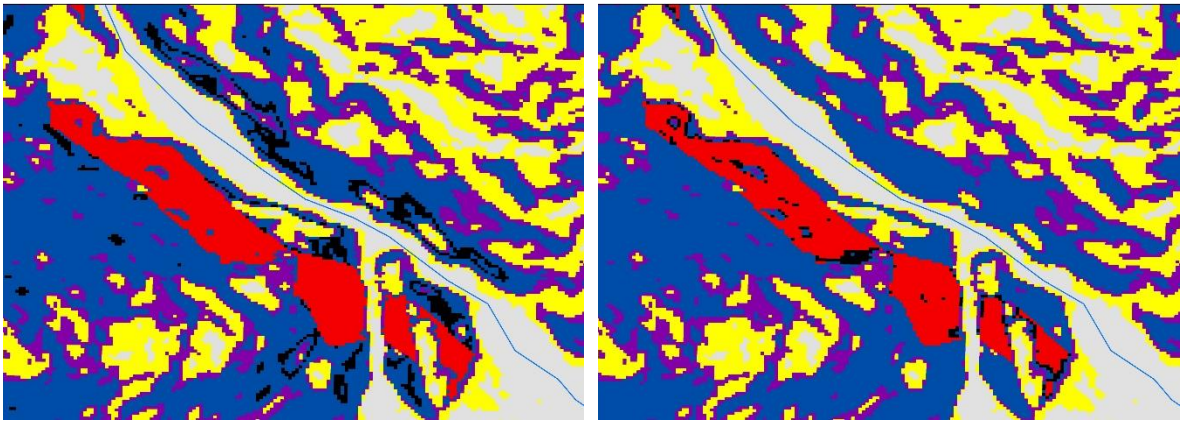


شکل ۱۳- تغییرات مکانی ضریب ایمنی حداقل در حوضهٔ آبخیز مورد مطالعه برای شرایط مختلف؛ الف) بعد از گذشت ۶ ساعت از شروع بارشِ مبنا؛ ب) بعد از گذشت ۱۲ ساعت از شروع بارشِ مبنا و ج) بعد از گذشت ۱۸ ساعت از شروع بارشِ مبنا

با تبدیل فایل‌های متنی ذخیره شده به فایل‌های رستری و ترسیم آنها در محیط GIS می‌توان تغییرات مکانی پارامترهای مختلف از جمله ضریب ایمنی را برای شرایط مختلف با یکدیگر مقایسه نمود. در شکل ۱۳ تغییرات مکانی ضریب ایمنی حداقل در حوضهٔ آبخیز مورد مطالعه، در زمان‌های مختلف از شروع بارندگیِ مبنا (شکل ۱۲-ب) محاسبه و نمایش داده شده است. در نمودارهای الف تا پ این شکل به ترتیب تغییرات ضریب ایمنی دامنه‌ها بعد از ۶، ۱۲ و ۱۸ ساعت از آغاز بارندگیِ مبنا نشان داده شده است. در نگاه اول این نقشه‌ها شبیه به هم به‌نظر می‌رسند، اما بررسی دقیق‌تر نشان می‌دهد که این نقشه‌ها تفاوت‌هایی با یکدیگر دارند. علت شباهت ظاهری این نقشه‌ها مقیاس کوچک آنها و وسعت منطقه در مقایسه با ابعاد سلول (پیکسل) های نقشه‌ها می‌باشد. برای نشان دادن بهتر اختلاف بین نقشه‌ها، در شکل ۱۴ الف و ب بخشی از نقشه‌های ۱۳-الف و ۱۳-ج با بزرگنماییِ بیشتر به نمایش درآمده است. مقایسهٔ این دو نقشه به خوبی نشان می‌دهد که تغییراتی در ضریب ایمنی پایداری

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1402.10.2.2.7]
[DOI: 10.61186/jsaeh.10.2.21]

برخی دامنه‌ها با گذشت زمان از شروع بارندگی اتفاق افتاده است و در برخی سلول‌های نقشه، مقدار ضریب ایمنی کاهش یافته و این باعث شده است که این سلول‌ها ناپایدار گشته یا به حالت ناپایدار نزدیکتر گردند.



(الف) (ب)

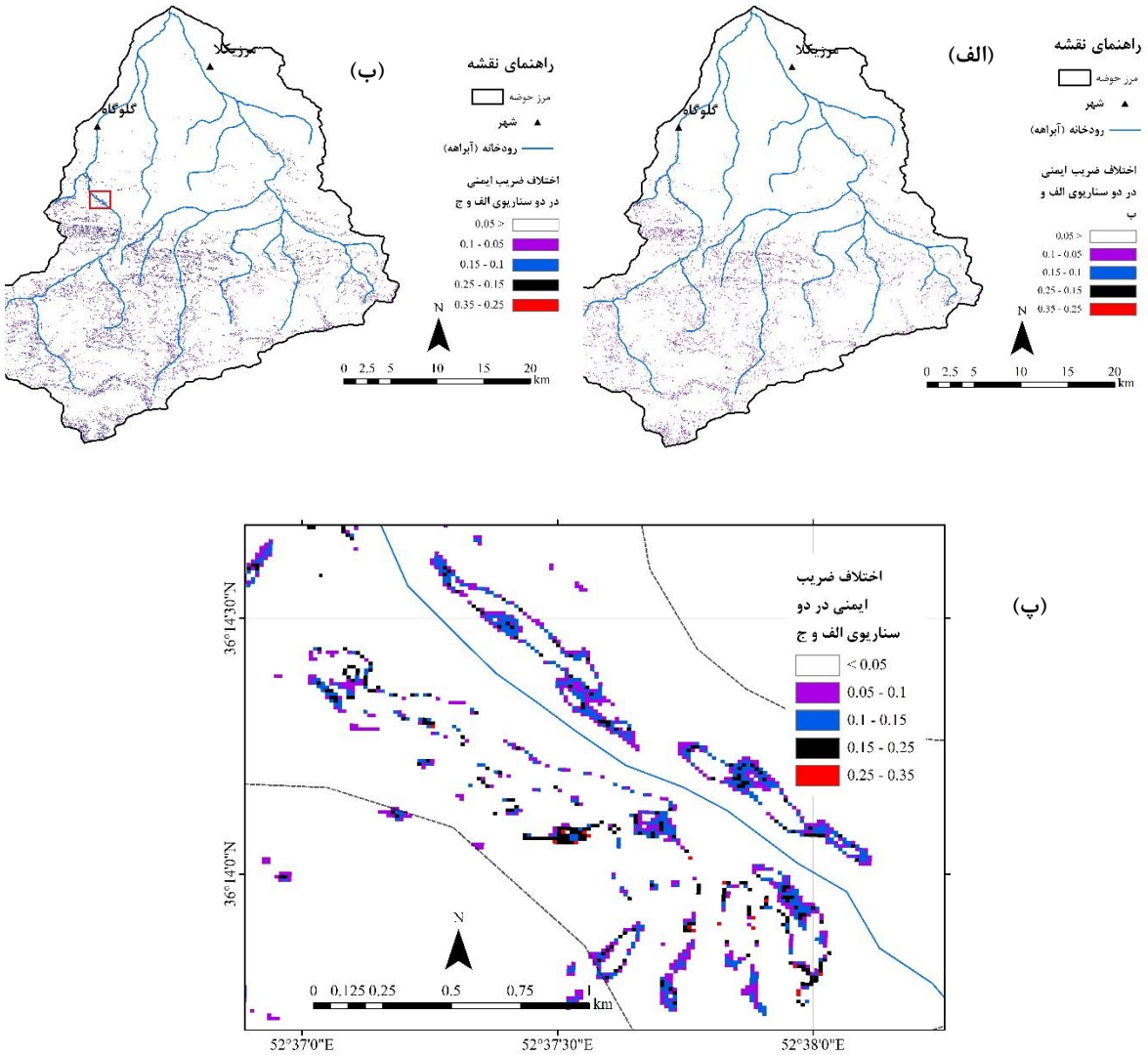
شکل ۱۴- تغییرات مکانی ضریب ایمنی حداقل در بخش کوچکی از حوضهٔ آبخیز مورد مطالعه با بزرگنمایی بیشتر؛ الف) بعد از گذشت ۶ ساعت از شروع بارش (کادر قرمزرنگ در شکل ۱۴-ب)؛ ب) بعد از گذشت ۱۸ ساعت از شروع بارش

برای بررسی بیشتر این موضوع، در شکل ۱۵-الف اختلاف بین ضرایب ایمنی محاسبه شده در زمان‌های ۶ و ۱۲ ساعت بعد از آغاز بارندگی ترسیم شده است. در شکل ۱۵-ب نیز اختلاف این پارامتر بین زمان‌های ۶ و ۱۸ ساعت بعد از آغاز بارندگی نشان داده شده است. در اینجا نیز با توجه به کوچک بودن ابعاد پیکسل‌های نقشه در مقایسه با وسعت حوزهٔ مورد مطالعه، بررسی نقشه کمی دشوار به نظر می‌رسد. به همین دلیل در شکل ۱۵-پ بخشی از نقشهٔ ارائه شده در شکل ۱۵-ب با بزرگنمایی بیشتر نشان داده شده است. با بررسی دقیقِ این نقشه‌ها، ملاحظه می‌شود که با گذشت زمان از آغاز بارندگی و افزایش شدت آن برخی از دامنه‌ها بین ۰/۰۵ تا ۰/۳ افت در ضریب ایمنی پایداری داشته‌اند.

- **مقایسهٔ نتایج تحلیل‌ها با مشاهدات صحرایی**

بررسی نقشه‌های ارائه شده در شکل ۱۳ و مقایسهٔ آن با نقشهٔ زون‌های تفکیک شده (شکل ۸-پ) نشان می‌دهد که مقادیر ضریب ایمنی در بخش‌های مرتفع و پرشیب زون ۶ کمتر از سایر زون‌هاست. بیشترین گسترش ضرایب ایمنی نزدیک به ۱ نیز در همین مناطق توزیع یافته‌اند. زون ۶ همانطور که در جدول ۱ نشان داده شده است، متشکل از خاک‌های برجایی است که حاصل هوازدگی سنگ‌هایی از جنس شیل و مارن هستند. در مطالعات صحرایی نیز مشخص گردید که اغلب زمین‌لغزش‌ها و جریان‌های واریزه‌ای و گِلی در خاک‌هایی اتفاق افتاده‌اند که بر روی سنگ بستر با ترکیب رسی مانند شیل و مارن قرار دارند. اصولاً از نظر زمین‌شناسی در سازندهایی مانند سازند شمشک و هم‌ارز سازند قم که گسترش وسیعی در منطقه دارند، این نوع ناپایداری‌ها پتانسیل وقوع بیشتری دارند. بنابراین، از این نظر همخوانی خوبی میان نقشه‌های تهیه شده و مشاهدات و بررسی‌های صحرایی وجود دارد.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1402.10.2.2.7]
[DOI: 10.61186/jsaeh.10.2.21]



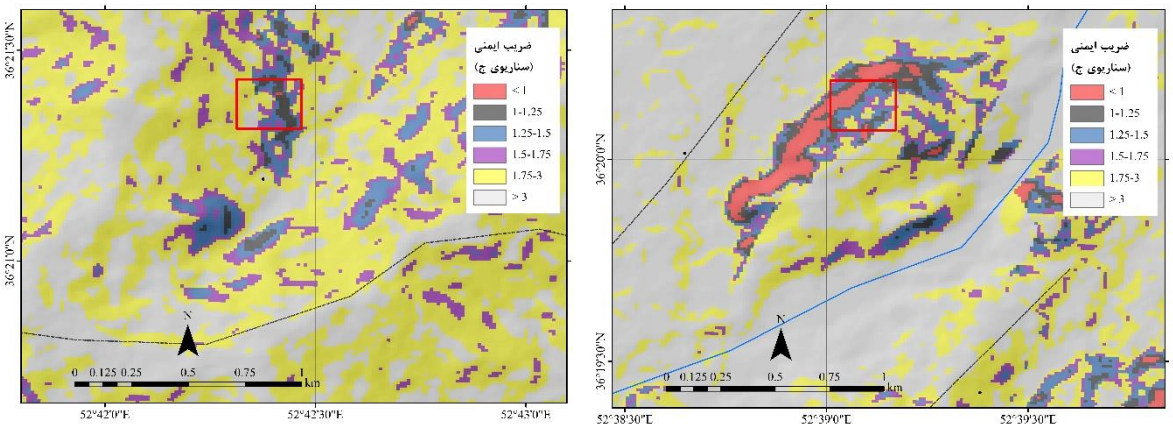
شکل ۱۵- اختلاف ضریب ایمنی حداقل در حوضهٔ آبخیز مورد مطالعه برای شرایط مختلف؛ الف) بعد از گذشت ۶ ساعت از شروع بارش؛ ب) بعد از گذشت ۱۸ ساعت از شروع بارش و پ) نمایش بخشی از نقشه با بزرگنمایی بیشتر (کادر قرمزرنگ در شکل ب)

بررسی نقشه‌های ارائه شده در شکل ۱۵ نیز نشان می‌دهد که افتِ ضریب ایمنی پایداری بعد از وقوع بارندگی‌ها باز هم در بخش‌هایی از زون ۶ که در بخش‌های مرتفع حوضه قرار دارند، بیشتر از نقاط دیگر حوضه رخ داده است. این موضوع نیز با مشاهدات صحرایی همخوانی خوبی نشان می‌دهد، به طوری که بعد از وقوع بارندگی‌های طولانی‌مدت، ناپایداری‌های دامنه‌ای از نوع لغزش‌های کم‌عمق و جریان گلی-واریزه‌ای در بخش‌های مرتفع حوضه بیشتر از سایر نقاط اتفاق می‌افتند. البته لازم به ذکر است که اینگونه زمین‌لغزش‌ها به دلیل عدم وجود جادهٔ دسترسی مناسب، صعب‌العبور بودن و غیرمسکونی بودن این بخش‌ها، وسعت و عمقِ کم و عدم اثرگذاری مستقیم بر سکونتگاه‌ها و جاده‌های روستایی منطقه، کمتر شناسایی شده و معمولاً در بانک‌های اطلاعاتی موجود ثبت نمی‌شوند، اگرچه، به دلیل افزایش پتانسیل فرسایش خاک و تأمین مصالح جریان‌های واریزه‌ای می‌توان به طور نسبی آنها را بااهمیت در نظر گرفت. نکتهٔ دیگری که از بررسی این نقشه‌ها قابل استنتاج است، این

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1402.10.2.2.7]
[DOI: 10.61186/jsaeh.10.2.21]

است که در اغلب دامنه‌های طبیعی حوضهٔ مورد مطالعه حتی بعد از بارندگی‌های طولانی مدت و با شدت بالا، افت ضریب ایمنی ناچیز است و فقط در تعداد کمی از دامنه‌ها (یا سلول‌های نقشه) این افت قابل توجه است و باعث کاهش ضریب ایمنی به کمتر از ۱ و در نتیجه ناپایدار شدن دامنه می‌گردد. این موضوع نیز با بررسی‌ها و مشاهدات صحرایی همخوانی دارد و در بارندگی‌هایی مانند بارندگیِ مبنا که مربوط به اسفند ۱۳۹۷ است مطابق انتظار فقط تعداد محدودی زمین‌لغزش در منطقه اتفاق می‌افتد و انتظار نمی‌رود که حرکات دامنه‌ای بخش‌های قابل توجهی از منطقه را دربرگیرد.

همانطور که در مقدمه این مقاله نیز اشاره گردید، در بارندگی رخ داده در اسفند ۹۷ که در این مطالعه به عنوان بارندگی مبنا در تحلیل‌ها مورد استفاده قرار گرفت، تعدادی زمین‌لغزش در نقاط مختلف حوضه به وقوع پیوست. برخی از این زمین‌لغزش‌ها به دلیل اثر مستقیم بر سکونتگاه‌های روستایی در سال ۱۳۹۸ مورد مطالعهٔ دقیق قرار گرفتند. از جمله می‌توان به دو زمین‌لغزش رخ‌داده در دو روستای ارکا و ازارسی اشاره نمود (پژوهشکده سوانح طبیعی، ۱۳۹۸الف و ب) که باعث خسارات قابل توجهی شدند. در شکل ۱۶-الف وب موقعیت این زمین‌لغزش‌ها بر روی نقشهٔ تغییرات مکانی ضریب ایمنی حداقل بعد از گذشت ۱۸ ساعت از شروع بارشِ مبنا، با بزرگنمایی بالا نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود این دو زمین‌لغزش در محدوده‌ای از نقشه قرار گرفته‌اند که در آن محدوده ضریب ایمنی محاسبه شده برای دامنه‌های طبیعی منطقه اغلب یا کمتر از ۱ است یا به عدد ۱ بسیار نزدیک است و نشان از پتانسیل بالای این دامنه‌ها برای وقوع لغزش دارد.

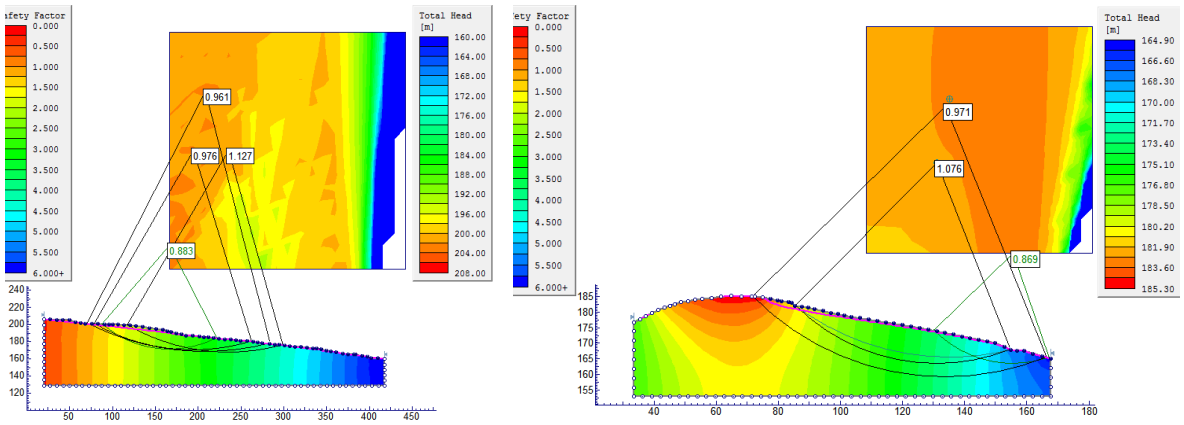


(ب) (الف)

شکل ۱۶- موقعیت زمین‌لغزش‌های الف) ارکا (کادر آبی‌رنگ) و ب) ازارسی (کادر بنفش‌رنگ) بر روی نقشهٔ تغییرات مکانی ضریب ایمنی حداقل بعد از گذشت ۱۸ ساعت از شروع بارشِ مبنا (شکل ۱۳-پ)

مطالعهٔ دقیق این زمین‌لغزش‌ها نیز نشان داد که بارندگی و اشباع شدن دامنه اثر قابل‌توجهی بر ضریب ایمنی پایداری خاک دارد، به‌گونه‌ای که هنگامی که دامنه اشباع از آب باشد (یعنی زمانی که بارندگی‌های با شدت و مدت زیاد رخ می‌دهند) ضریب ایمنی دامنه در مقابل گسیختگی‌های از نوع شیب نامحدود و دایره‌ای کمتر از ۱ خواهد بود (پژوهشکده سوانح طبیعی، ۱۳۹۸الف و ب). برای نمونه نتایج تحلیل پایداری این دامنه‌ها که در گزارش پژوهشکدهٔ سوانح طبیعی ارائه شده است، در حالت اشباع و برای گسیختگی‌های دایره‌ای کم‌عمق در شکل ۱۷-الف و ب نشان داده شده است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1402.10.2.2.7]
[DOI: 10.61186/jsaeh.10.2.21]



(الف) (ب)

شکل ۱۷- نتایج تحلیل پایداری زمین‌لغزش‌های الف) ارکا و ب) ازارسی، در حالت اشباع و برای گسیختگی‌های دایره‌ای کم‌عمق با استفاده از نرم‌افزار Slide (پژوهشکده سوانح طبیعی، ۱۳۹۸الف و ب)

نتیجه‌گیری

در این مطالعه تلاش شد که ارتباط میان فاصلهٔ زمانی شروع بارش در یک بارندگیِ مبنا با وقوع لغزش‌های کم‌عمق و جریان‌های گلی-واریزه‌ای در یک حوضهٔ آبخیز نسبتاً وسیع مورد بررسی قرار گیرد. نتایج این مطالعه همخوانی قابل قبولی با تجارب حاصل از بررسی‌های میدانی در زمینهٔ وقوع زمین‌لغزش‌های ناشی از بارندگی در حوضهٔ مورد مطالعه نشان می‌دهد. نتایج این مطالعه نشان داد که در نواحی مرتفع حوضه، به دلیل وجود خاک‌های مستعدتر و شیب بیشتر دامنه‌ها، ضریب ایمنی پایداری دامنه‌ها در مقایسه با سایر نقاط حوضه کمتر است. بیشترین افت ضریبِ ایمنی پایداری ناشی از افزایش درصد رطوبت نیز در همین بخش‌های حوضه رخ می‌دهد. بررسی‌های صحرایی نیز نشان می‌دهد که اغلب لغزش‌های کم‌عمق و جریان‌های گلی-واریزه‌ای ناشی از بارندگی در همین مناطق یعنی جایی که سازند شمشک در شیب‌های نسبتاً تند گسترش دارد، و هنگامی که بارندگی‌های طولانی مدت با شدت زیاد رخ می‌دهند، به وقوع می‌پیوندند. این مطالعه نشان داد که ترکیبی از عواملی مانند جنس خاک و شیب حوضه به عنوان عوامل ذاتی و مقدار بارندگی به عنوان عامل محرک، کنترل‌کنندهٔ لغزش‌های کم‌عمق در حوضهٔ مورد مطالعه هستند. بنابراین نقش این عوامل در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش‌های ناشی از بارندگی باید بیشتر از سایر عوامل در نظر گرفته شود.

همانطور که مشاهده شد، در این پژوهش ضمن در نظر گرفتن مکانیسم وقوع و تمام عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش‌ها، لغزش‌های کم‌عمق ناشی از بارندگی به طور کامل شبیه‌سازی شده و مدل مفهومی کاملی برای تهیه نقشه استعداد اینگونه ناپایداری‌ها در مقیاس ناحیه‌ای ارائه شد. در مطالعات پهنه‌بندی رایج معمولاً مکانیسم زمین‌لغزش‌های رخ‌داده، در تحلیل‌ها نادیده گرفته می‌شود و روش‌های مرسوم پهنه‌بندی از این نظر دارای نقص هستند. همچنین، معیار پهنه‌بندی در این مطالعه ضریب ایمنی پایداری شیب است که برخلاف سایر شاخص‌هایی که در روش‌های دیگر استفاده می شوند، معیاری مناسب‌تر برای ارزیابی پایداری شیب‌ها محسوب می‌شود.

نقشه‌های توزیع ضریب ایمنی تهیه شده در این مطالعه، نقشه‌هایی کاربردی از دیدگاه پیش‌بینی پایداری دامنه‌ها به هنگام

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1402.10.2.2.7]
[DOI: 10.61186/jsaeh.10.2.21]

وقوع بارندگی محسوب می‌شوند. با استفاده از این نقشه‌ها می‌توان توزیع مکانی زمین‌لغزش‌های ناشی از بارندگی (لغزش‌های کم‌عمق و جریان‌های واریزه‌ای-گِلی) و زمان وقوع آنها را با توجه به میزان و شدت بارندگی پیش‌بینی نمود. تهیهٔ اینگونه نقشه‌ها با مقیاس‌های بزرگتر و دقیق‌تر و با انجام مطالعات کامل‌تر زمین‌شناسی، زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیکی برای زیرحوضه‌های مهمی که در آنها طرح‌های توسعهٔ شهری و روستایی یا ایجاد زیرساخت‌های اساسی و ابرسازه‌های مهندسی (بزرگراهها و خطوط راه‌آهن)، برنامه‌ریزی یا اجرا شده است، ضرورتی انکارناپذیر در کلیه مراحل تصمیم‌گیری، امکان‌سنجی، طراحی، اجرا و بهره‌برداری می‌باشد.

منابع

پژوهشکدهٔ سوانح طبیعی (۱۳۹۸الف) گزارش مطالعات مطالعات پایدارسازی روستای ازارسی در برابر خطر زمین لغزش (شهرستان بابل، استان مازندران)، منتشر نشده.

پژوهشکدهٔ سوانح طبیعی (۱۳۹۸ب) گزارش مطالعات مطالعات پایدارسازی روستای ارکا در برابر خطر زمین لغزش (شهرستان بابل، استان مازندران)، منتشر نشده.

Alvioli, M.; M., Melillo; F., Guzzetti; M., Rossi; E., Palazzi; J., Von Hardenberg; M.T., Brunetti and S., Peruccacci. ۲۰۱۸. Implications of climate change on landslide hazard in Central Italy. Science of the Total Environment, ٦٣٠:١٥٢٨–١٥٤٣. https://doi.org/١٠,١٠١٦/j.scitotenv.٢٠١٨,٠٢,٣١٥

Baum, R.L.; W.Z., Savage and J.W., Godt. ۲۰۰۲. TRIGRS—A Fortran program for transient rainfall infiltration and grid-based regional slope stability analysis: U.S. Geological Survey Open-File Report ۰۲-۰٤۲٤.

Baum, R.L.; W.Z., Savage and J.W., Godt. ۲۰۰۸. TRIGRS—A Fortran Program for Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability Analysis, Version ۲,۰: U.S. Geological Survey Open-File Report ۲۰۰۸–۱۱۵۹.

Baum, R.L.; J.W., Godt and W.Z., Savage. ۲۰۱۰. Estimating the timing and location of shallow rainfall-induced landslides using a model for transient, unsaturated infiltration, Journal of Geophysical Research, **۱۱۵(۳)**: ۱-۲٦.

Brabb, E. and B., Harrod. ۱۹۸۹. Landslides: Extent and Economic Significance, A. A. Balkema Publisher, Rotterdam: ۳۸٥.

Catani, F.; S., Segoni and G., Falorni. ۲۰۱۰. An empirical geomorphology-based approach to the spatial prediction of soil thickness at catchment scale. Water Resources Research ٤٦, W٠٥٥٠٨.

Ciurleo, M.; S., Ferlisi; V., Foresta; M.C., Mandaglio and N., Moraci. ۲۰۲۲. Landslide Susceptibility Analysis by Applying TRIGRS to a Reliable Geotechnical Slope Model. Geosciences (Switzerland), ۱۲(۱). https://doi.org/١٠,٣٣٩٠/geosciences١٢٠١٠٠١٨

Delmonaco, G.; G., Leoni, C., Margottini, C., Puglisi and D., Spizzichino. ۲۰۰۳. Large scale debris flow hazard assessment: a geotechnical approach and GIS modeling. Natural Hazards and Earth System Sciences **۳**: ٤٤٣–٤٥٥.

Dietrich, W.E.; R., Reiss, M.L., Hus and D.R., Montgomery. ۱۹۹٥. A process-based model for colluvial soil depth and shallow landsliding using digital elevation data. Hydrological Processes ۹: ۳۸۳–٤۰۰.

Freeze, R.A. and J.A. Cherry. ۱۹۷۹. Groundwater, ٦۰٤ pp., Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.

Gioia, E.; S., Gabriella; M., Ferretti; F., Marincioni; J., Godt and R., Baum. ۲۰۱۳. Rainfall-induced shallow landslide forecasting in large areas: application of the TRIGRS model over a broad area of post-orogenic Quaternary sediments.

Grelle, G.; M., Soriano, P., Revellino, L., Guerriero, M.G., Anderson, A., Diambra, F., Fiorillo, L., Esposito, N., Diodato and F.M., Guadagno. ۲۰۱٤. Space-Time Prediction of Rainfall-Induced Shallow Landslides through a Combined Probabilistic/Deterministic Approach, Optimized for Initial Water Table Conditions. Bulletin of

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.24237892.1402.10.2.2.7]

[DOI: 10.61186/jsaeh.10.2.21]

Engineering Geology and the Environment, **۷۳**: ۸۷۷-۸۹۰.

Iverson, R.M. ۲۰۰۰. Landslide triggering by rain infiltration: Water Resources Research. ۳٦(۷): ۱۸۹۷–۱۹۱۰.

Liao, Z.; Y., Hong, D., Kirschbaum, R.F., Adler, J.J., Gourley and R., Wooten. ۲۰۱۱. Evaluation of TRIGRS (transient rainfall infiltration and grid-based regional slope-stability analysis)'s predictive skill for hurricane-triggered landslides: a case study in macon county, north carolina, Nat. Hazards, **۵۸(۱)**: ۳۲۵-۳۳۹.

Liu, C.N. and C.C., Wu. ۲۰۰۸. Mapping susceptibility of rainfall-triggered shallow landslides using a probabilistic approach, Environ Geol, **۵۵(٤)**: ۹۰۷-۹۱۵.

Morgenstern, N.R. ۱۹۹۲. The evaluation of slope stability – A ۲۵-year perspective, in: Stability and Performance of Slopes and Embankments – II, Geotechnical Special Publication No. ۳۱, ASCE, New York.

Park, D.W.; N.V., Nikhil and S.R., Lee. ۲۰۱۳. Landslide and debris flow susceptibility zonation using TRIGRS for the ۲۰۱۱ Seoul landslide event, Nat. Hazards Earth Syst. Sci, **۱(۳)**:۲۵٤۷-۲۵۸.

Richards, L. ۱۹۳۱. Capillary conduction of liquids through porous mediums, Physics, ۱:۳۱۸–۳۳۳

Salciarini, D.; J.W., Godt; W.Z., Savage; P., Conversini; R.L., Baum and J.A., Michael. ۲۰۰٦. Modeling regional initiation of rainfall-induced shallow landslides in the eastern Umbria Region of central Italy. Landslides, **۳**(۳):۱۸۱–۱۹۴. https://doi.org/۱۰.۱۰۰۷/s۱۰۳۴۶-۰۰۶-۰۰۳۷-۰

Saulnier, G.M.; K.J., Beven and C., Obled. ۱۹۹۷. Including spatially variable effective soil depths in TOPMODEL. Journal of Hydrology ۲۰۲:۱۵۸–۱۷۲.

Savage, W.Z.; J.W., Godt, and R.L., Baum. ۲۰۰۳. A model for spatially and temporally distributed shallow landslide initiation by rainfall infiltration, in Rickenmann, D., and Chen, C., eds., Debris- flow hazards mitigation—mechanics, prediction and assessment: Rotterdam, Millpress, p:۱۷۹–۱۸۷.

Savage, W.Z.; J.W., Godt, and R.L., Baum. ۲۰۰٤. Modeling time-dependent aerial slope stability, in Lacerda, W.A., Erlich, M., Fontoura, S.A.B., and Sayao, A.S.F., eds., Landslides—Evaluation and stabilization, Proceedings of the ۹th International Symposium on Landslides: London, A.A. Balkema Publishers, ۱: ۲۳–۳٦.

Schilirò, L.; C., Esposito and G., Scarascia Mugnozza. ۲۰۱۵. Evaluation of shallow landslide-triggering scenarios through a physically based approach: An example of application in the southern Messina area (northeastern Sicily, Italy). Natural Hazards and Earth System Sciences, **۱۵(۹)**, ۲۰۹۱–۲۱۰۹.

Schilirò, L.; J., Cepeda; G., Devoli and L., Piciullo. ۲۰۲۱. Regional analyses of rainfall-induced landslide initiation in upper gudbrandsdalen (South-eastern Norway) using TRIGRS model. Geosciences (Switzerland), **۱۱(۱)**: ۱–۱۵.

Srivastava, R. and T.C.J., Yeh. ۱۹۹۱. Analytical solutions for one-dimensional, transient infiltration toward the water table in homogeneous and layered soils: Water Resources Research ،**۲۷**: ۷۵۳–۷۶۲.

Tarboton, D.G. ۱۹۹۷. A new method for the determination of flow directions and contributing areas in grid digital elevation models: Water Resources Research, **۳۳(۲)**: ۳۰۹–۳۱۹.

Vieira, B.C.; N.F., Fernandes; O., Augusto Filho; T.D., Martins and D.R., Montgomery. ۲۰۱۸. Assessing shallow landslide hazards using the TRIGRS and SHALSTAB models, Serra do Mar, Brazil. Environmental Earth Sciences, **۷۷(٦)**. https://doi.org/۱۰,۱۰۰۷/s۱۲٦٦۵-۰۱۸-۷٤۳٦-۰

Viet, T.T.; G., Lee, T.M., Thu and H.U., An. ۲۰۱۷. Effect of Digital Elevation Model Resolution on Shallow Landslide Modeling Using TRIGRS, Natural Hazards Review, **۱۸ (۲)** - May ۲۰۱۷

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.24237892.1402.10.2.2.7]

[DOI: 10.61186/jsaeh.10.2.21]