

تحلیل استعداد رخداد جریان‌های واریزهای و لغزش‌های کم‌عمق با استفاده از مدل تریگرز (مطالعه موردی: حوضه 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^۱؛ دانشیار گروه زمین‌شناسی مهندسی، دانشکده زمین‌شناسی، دانشکدگان علوم، دانشگاه تهران

ابوالقاسم گورابی؛ دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران

مصطفی کریمی‌احمد‌آباد؛ دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران

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

چکیده

در این مطالعه، به بررسی پتانسیل وقوع زمین‌لغزش‌های کم‌عمق ناشی از بارندگی در حوضه 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 طولانی مدت در آن رخ می‌دهد. این زمین‌لغزش‌ها که با مکانیسم لغزش در بخش‌های بالایی پوشش خاک آغاز می‌شوند، بلافصله تبدیل به جریان‌های گلی-واریزهای شده و از به هم پیوستن آنها ممکن است جریان‌های واریزهای-گلی بزرگ در پایین دست حوضه شکل بگیرد که پدیده‌ای مخرب محسوب می‌شود. در این پژوهش، برای بررسی تأثیر بارندگی بر وقوع زمین‌لغزش‌های کم‌عمق و جریان‌های واریزهای-گلی از برنامه‌ای تریگرز (TRIGRS) که بر نامه‌ای 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 پدیده طبیعی به طور کامل شبیه‌سازی می‌گردد. داده‌های ورودی مورد نیاز برای این پژوهش شامل داده‌های توپوگرافی حوضه، ویژگی‌های زمین‌شناسی، زمین‌شناسی مهندسی و هیدرولوژیکی واحدهای حاکی (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 برنامه تریگرز شامل نقشه‌های توزیع مکانی و 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 هر جا 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 زمین‌لغزش‌های 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

مقدمه

زمین‌لغزش‌های ناشی از بارندگی از جمله پدیده‌های رایجی هستند که در نقاط مختلف دنیا به طور مکرر اتفاق می‌افتد 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 اوایل 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 حوضه 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 قابل توجهی را بر جا 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 به دست 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 نحوه 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 آستانه 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 برنامه مبتنی بر شبکه مثل برنامه TRIGRS^۲

^۱ Infinite slope

^۲ Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability Analysis (TRIGRS)

استفاده نمود (به بند ۲-۳ مراجعه شود).

اگرچه برنامه 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 بین‌المللی از برنامه 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 برنامه 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 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 برنامه تریگرز وجود داشته و بنابراین منبع قابل اعتمادی برای استفاده می‌باشد. این مطالعات نشان داد که این نرم‌افزار جهت تهیه نقشه‌های احتمال وقوع زمین‌لغزش‌های کم عمق و یا پیش‌بینی زمین‌لغزش‌های ناشی از بارندگی قابل استفاده بوده و حتی در نواحی که داده‌های ژئوتکنیکی و هیدرولوژیکی موجود نمی‌باشد هم کاربردی است (Gioia et al., ۲۰۱۳). در مطالعه‌ای دیگر پارک و همکاران (Park et al., ۲۰۱۳) از این نرم‌افزار جهت پیش‌بینی جریان‌های واریزهای استفاده کردند. درواقع از مازول‌های 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 کم عمق با استفاده از برنامه 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.

آلوبئولی 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 TRIGRS 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 برنامه TRIGRS و SHALSTAB را برای پیش‌بینی زمین‌لغزش‌های کم عمق با در نظر گرفتن پارامترهای مکانیکی و ضخامت خاک متفاوت، مقایسه کردند. در مطالعه آنها عملکرد هر دو مدل با مقایسه نتایج آن‌ها با نقشه‌های خطر سنجیده شده و هر دو در پیش‌بینی زمین‌لغزش‌های کم عمق کارآمد شمرده شدند.

در منطقه جنوب شرقی نرژی 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 با وجود کاهش شدت بارش‌ها در انتهای سال ۲۰۱۳، میزان ناپایداری دامنه‌ها در منطقه نسبت به سال ۲۰۱۱ افزایش یافته است. هم‌چنان میزان حساسیت نرم‌افزار به پارامترهای ورودی نرژی بررسی شده و مشخص شد پارامترهای مکانیکی خاک و ضخامت خاک بیشترین تاثیر را بر روی شرایط پایداری 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 مطالعه حاضر نرژی تلاش شده است که با استفاده از تجارب به دست‌آمده از مطالعه زمین‌لغزش‌های پس از بارندگی در حوضه 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 محرك وقوع لغزش‌های متعدد در دامنه‌های طبیعی شوند (به‌ویژه لغزش‌های کم‌عمق و جریان‌های واریزهای-گلی متعاقب آنها)، شناسایی شوند.

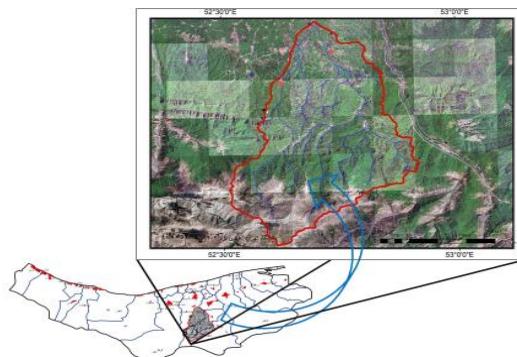
هدف اصلی از انجام این مطالعه، تهیه نقشه‌های توزیع ضریب ایمنی است که نقشه‌هایی کاربردی از دیدگاه پیش‌بینی پایداری دامنه‌ها به هنگام وقوع بارندگی محسوب می‌شوند. با استفاده از این نقشه‌ها می‌توان توزیع مکانی زمین‌لغزش‌های ناشی از بارندگی (لغزش‌های کم‌عمق و جریان‌های واریزهای-گلی) و زمان وقوع آنها را با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

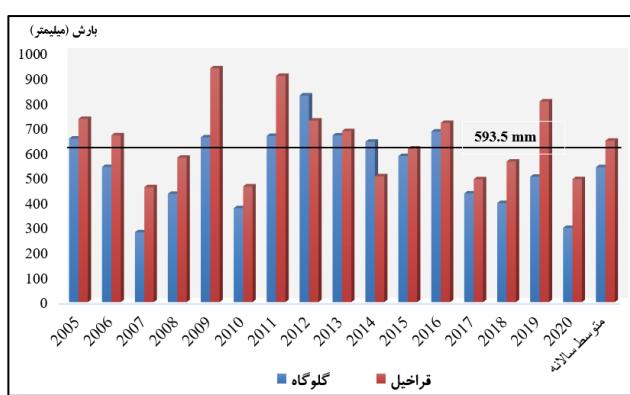
داده ها و روش کار

• قلمرو جغرافیایی مورد مطالعه

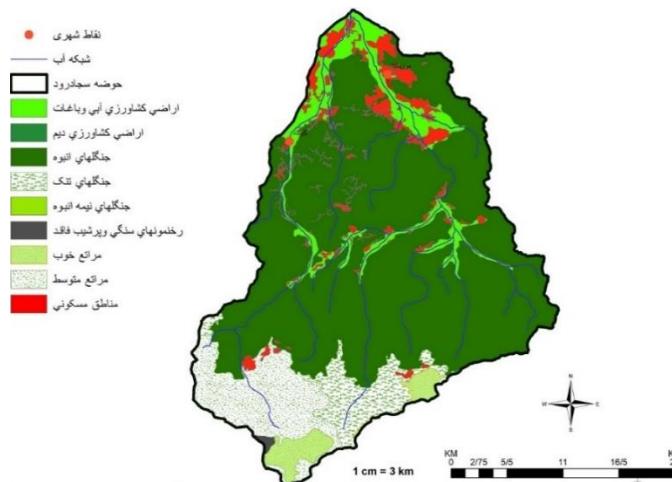
حوضه آبخیز بابل رود به مساحت ۹۲۳.۳ کیلومتر مربع در استان مازندران و در دامنه شمالی رشته کوه های البرز واقع شده است و بخشی از حوضه آبریز بزرگتر هراز-قره سو محسوب می شود (شکل ۱). از نظر توپوگرافی اغلب بخش های خزر به تدریج از ارتفاع و شیب دامنه ها کاسته می شود. حداقل و حداقل ارتفاع این حوضه به ترتیب ۱۴ و ۳۶۹۳ متر می باشد. این حوضه از دیدگاه اقلیمی، منطقه ای سرد و مرطوب با میانگین بارندگی سالیانه بیش از $593\frac{3}{4}$ میلیمتر می باشد (شکل ۲). فصل پاییز با حدود ۳۰ درصد از بارندگی کل در هر یک از ایستگاه های باران سنجی معرفی شده در شکل ۲، مرطوب ترین فصل و تابستان و بهار نیز با داشتن حدود ۲۰ درصد از کل بارندگی سالیانه در هر یک از ایستگاه های معرفی شده خشک ترین فصول سال در این منطقه می باشند. پوشش گیاهی این حوضه عمدتاً از نوع جنگلی است به گونه ای که بیشتر از $76\frac{4}{4}$ درصد مساحت حوضه تو سط جنگل پوشیده شده است (شکل ۳). بخش شمالی حوضه، جایی که شیب زمین کمتر است، زمین های کشاورزی و باغات گسترش زیادی دارند.



شکل ۱- موقعیت حوضه آبخیز بابل رود بر روی تصویر ماهواره ای منطقه



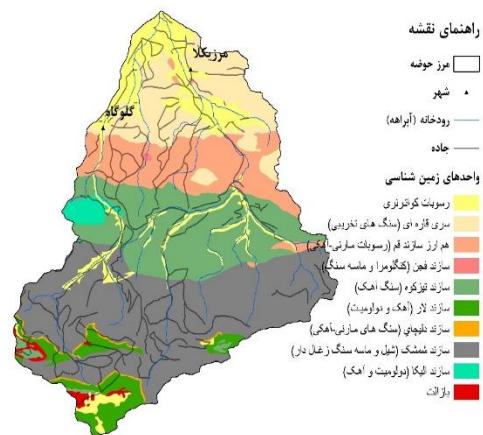
شکل ۲- نمودار متوسط بارندگی سالیانه در فاصله سال های ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۰ بر اساس داده های ایستگاه های سینوپتیک گلوگاه و قراخیل



شکل ۳- نقشه پوشش گیاهی و کاربری زمین در حوضه آبخیز بابل رود

حوضه بابل رود از دیدگاه زمین‌شناسی در دامنه شمالی زون البرز مرکزی واقع شده است و شامل واحدهای چینه‌شناسی مختلفی از تربیس 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 نهشتله‌های 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 عمدها 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 پدیده هوازدگی حساسیت متفاوتی داشته و بسته به ترکیب کانی‌شناسی آنها، نوع و تراکم پوشش گیاهی، میزان شبیب 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 نقشه زمین‌شناسی حوضه 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 اوخر اسفند ۱۳۹۷، در حوضه آبخیز بابل رود تعداد زیادی لغزش کم‌عمق با ابعاد کوچک تا متوسط (و متعاقب آن جریان‌های گلی-واریزه‌ای) به‌وقوع پیوست که خسارات قابل توجهی را بر جا 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 با غله، راه‌های ارتباطی روستایی و منازل روستایی از جمله این خسارات‌ها 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 زمرة لغزش‌های کم‌عمق قابل طبقه‌بندی هستند.



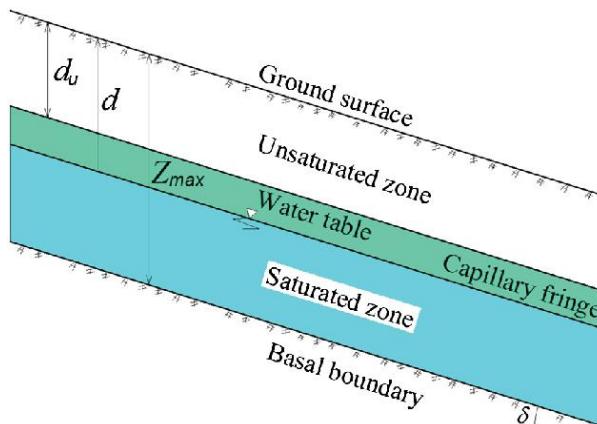
شکل ۴- نقشه زمین‌شناسی حوضه بابل رود؛ بر اساس نقشه زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ قائم شهر (سازمان زمین‌شناسی کشور)



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

• 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 تشکیل‌دهنده 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 جایجا 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 نحوه 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 حوضه 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 بالای سنگ بستر است، می‌توان برای تحلیل پایداری لغزش‌های کم عمق از مدل شیب بی‌نهایت استفاده نمود که در آن سطح گسیختگی نیز موازی با سطح زمین و سنگ بستر فرض می‌شود. در این حالت، ضریب ایمنی پایداری دامنه از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$F_s(Z, t) = \frac{\tan \phi'}{\tan \delta} + \frac{c' - \psi(Z, t)\gamma_w \tan \phi'}{\gamma_s Z \sin \delta \cos \delta} \quad \text{رابطه (۱)}$$

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 شبیه زمین و درصد وزن مخصوص خاک است. پارامتر (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). معادله ریچاردز که یک معادله دیفرانسیل جزئی غیرخطی است، راه حل تحلیلی فرم بسته ندارد و برای حل آن از راه حل‌های تقریبی، در شرایط اشباع (Iverson, ۲۰۰۰) و غیراشباع (Savage et al., ۲۰۰۳، ۲۰۰۴; Srivastava and Yeh, ۱۹۹۱) استفاده می‌شود.

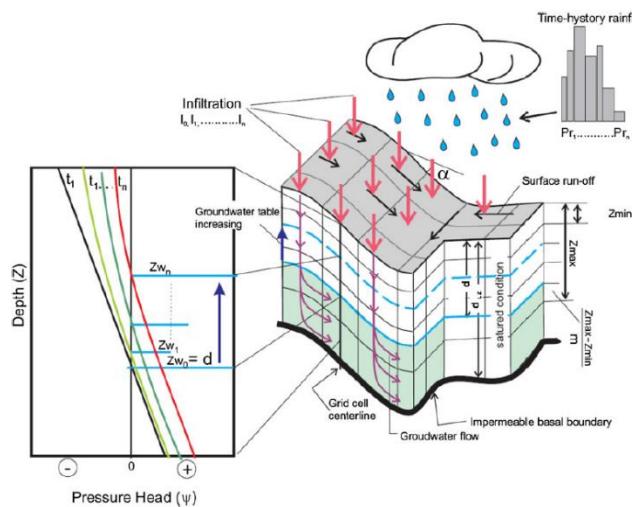
برای اینکه رویکرد مدل‌سازی برای دامنه وسیع تری از شرایط رطوبتی اولیه خاک قابل اجرا باشد، باوم و همکاران (Baum et al., ۲۰۰۸) یک راه حل تحلیلی برای جریان آب زیرزمینی در خاک غیراشباع نیز توسعه داده‌اند. این گزینه، خاک را به عنوان یک سیستم دو لایه شامل: ۱) منطقه اشباع شده در زیر سطح آب که توسط یک زون مویینه 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 می‌کند جذب می‌کند و آب باقیمانده از زون غیراشباع عبور می‌کند و در پایین ناحیه غیراشباع بالای سطح آب اولیه تجمع می‌یابد. در این مدل، ناحیه غیراشباع مانند فیلتری عمل می‌کند که نفوذ سطحی را در عمق تضعیف کرده و به تأخیر می‌اندازد.

• برنامه تریگرز

برنامه تریگرز برنامه‌ای کاربردی برای تحلیل پایداری شبیه‌ها در مقیاس ناحیه‌ای است. این برنامه به زبان فرتون و توسط باوم و همکاران (Baum et al., ۲۰۰۲، ۲۰۰۸) در سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده آمریکا تهیه شده است. تریگرز در دو دهه گذشته در کشورهای متعددی برای تجزیه و تحلیل زمین‌لغزش‌ها 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 برنامه تریگرز چند تئوری مختلف شامل: ۱) نفوذ آب باران به داخل زمین، ۲) جریان زیرسطحی آب نفوذی، ۳) مسیریابی رواناب و ۴) پایداری شبیه (تحلیل شبیه بی‌نهایت) با هم ترکیب می‌شوند تا اثرات بارش‌ها بر پایداری شبیه‌ها 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 آیرسون (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 آیرسون (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.



شکل ۷- اجزای مختلف مدل تحلیل پایداری شبیه در برنامه تریگرز (Grelle et al., ۲۰۱۴)

برنامه تریگرز می‌تواند برای مدل‌سازی و پیش‌بینی زمان‌بندی و توزیع مکانی زمین‌لغزش‌های کم‌عمق و ناشی از بارندگی در یک منطقه یا حوضه آبخیز وسیع استفاده شود (Baum et al., ۲۰۰۲، ۲۰۰۸، ۲۰۱۰). در نتیجه، این برنامه یک برنامه مبتنی بر شبکه است و محاسبات برای هر سلول به صورت جداگانه صورت می‌گیرد. مجموعه سلول‌های چهارگوش که ابعاد منظم و ثابتی در کل حوضه دارند، شبکه مورد مطالعه را تشکیل می‌دهند. در واقع، محدوده جغرافیایی حوضه 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 می‌شوند، منطبق است.

در درون هر سلول، زمین به عنوان یک سیستم دولایه مدل‌سازی می‌شود که شامل یک منطقه اشباع در پایین با زون مؤئینگی 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 می‌کند. 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 کم‌عمق ناشی از بارندگی، با اتخاذ رویکرد شبیه به نهایت و در مقیاس ناحیه‌ای، نیازمند داده‌هایی است (جدول ۱) که برخی در طول زمان متغیر و برخی ثابت هستند. پارامترهای شامل خواص ژئوتکنیکی و هیدرولوژیکی مصالح تشکیل‌دهنده دامنه (دانسیته، چسبندگی، زاویه اصطکاک، محتوای آب، هدایت هیدرولیکی اشباع) و ویژگی‌های هندسی دامنه (شبیه دامنه و صفحه لغزش و عمق سطح گسیختگی) می‌شوند. ثابت بودن این پارامترها در طول زمان از فرض‌های

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 برنامه مبتنی بر شبکه‌ای از سلول‌های منظم است و اغلب داده‌های ورودی مورد نیاز آن (مانند ارتفاع و شیب، نوع و عمق خاک، عمق اولیه 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

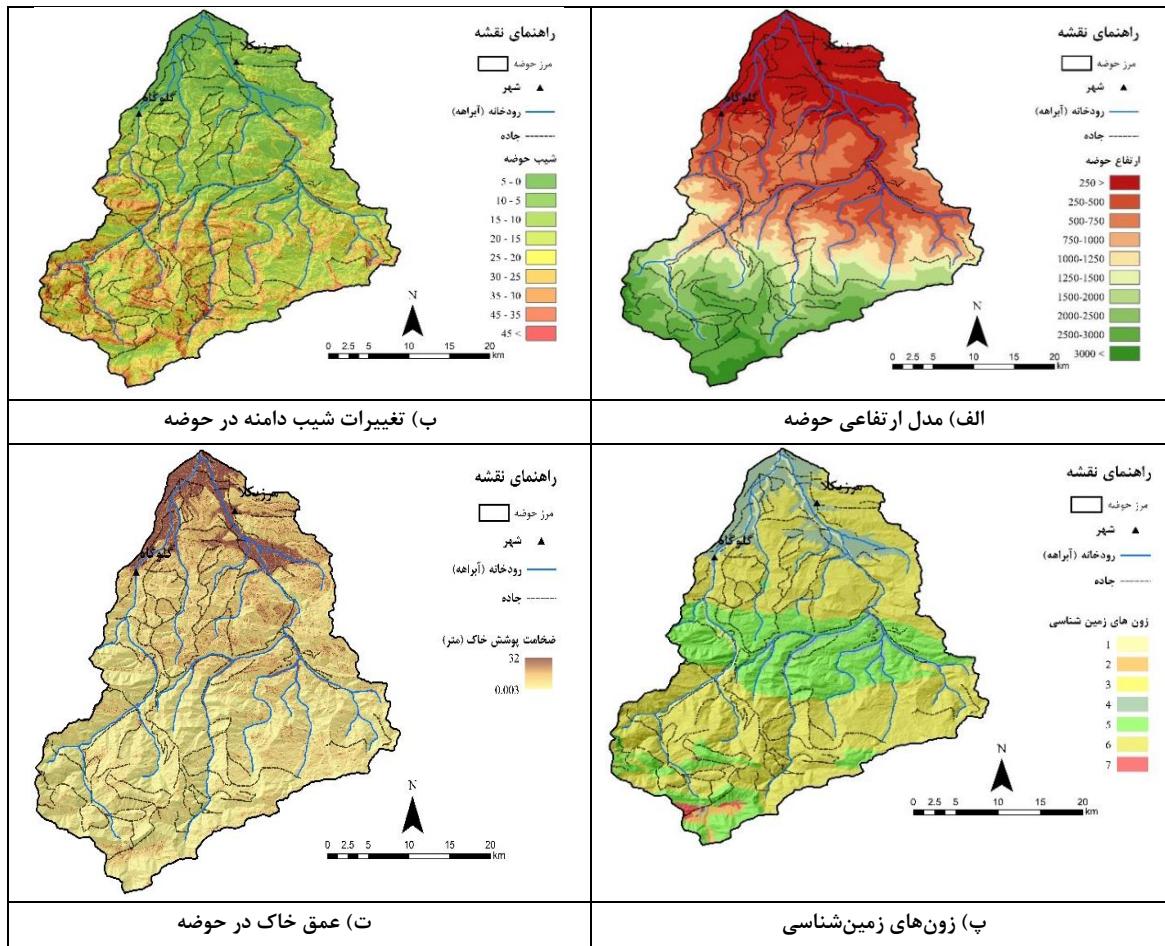
پارامترهای بارش	پارامترهای هیدروژئولوژیکی	پارامترهای مکانیکی خاک	پارامترهای زمین‌ریختشناسی	پارامترهای زمین‌شناسی
شدت بارش	ضریب انتشار هیدرولیکی (D_s)	چسبندگی (C)	مدل ارتفاع رقومی (DEM)	عمق خاک (Z_{max})
مدت بارش	هدایت هیدرولیکی اشباع (K_s) رطوبت حجمی اشباع (θ_s) رطوبت حجمی باقی‌مانده (θ_r) نرخ نفوذ اولیه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

الف- مدل ارتفاعی رقومی

مهمترین داده رقومی مورد نیاز در این پژوهش، مدل ارتفاعی رقومی منطقه است که به عنوان داده 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، شبکه 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 برنامه تریگرز بر مبنای آن بنا نهاده شده است، زاویه 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).



شکل ۸- نقشه‌های عوامل مختلف که فایل متون آنها داده‌های ورودی برنامه‌تریگر را هستند

پ- رواناب و نحوه توزیع آن در حوضه

بسطه 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 پایین دست قرار دارند، جریان خواهد 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 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.

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

ت- عمق آب زیرزمینی

عمق آب زیرزمینی نقش اساسی در پایداری شبیه‌ها و به ویژه در مدل پایداری به کار گرفته 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 هیدرولوژیکی منطقه شده است. عمق سطح آب زیرزمینی به شبیه 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 شبیه‌های تندر، 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 بر جا (حاصل از هوازدگی سنگ بستر)، نهشته‌های آبرفتی، رسوبات دشت سیلابی، پادگانهای و مصالح لغزشی و واریزهای 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-ب).

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 قضاؤت مهندسی، مقادیر تبییک پارامترهای ژئوتکنیکی مشخص گردد. این پارامترها برای زون‌های شش گانه 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 صحبت‌سنجی پارامترهای ژئوتکنیکی در نظر گرفته شده برای واحدهای خاکی تفکیک شده استفاده شده است. نمونه‌ای از این مطالعات مربوط به طرح ثبیت

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 ضربی ایمنی پایداری و تغییرات آن حین بارندگی مؤثر باشد.

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

ویژگی‌های زمین‌شناسی	مقادیر تیپیک پارامترهای ژئوتکنیکی						نوع	زون
	نفوذپذیری (مترب ثانیه)	زاویه اصطکاک (درجه)	جنسیندگی (kPa)	وزن واحد حجم (gr/cm ³)	دانه‌بندی			
حاوی قطعات در حد قلوه‌سنگ و بزرگتر، گردشده	1×10^{-6}	۴۰-۴۵	< ۱۰	۲/۱	درشت‌دانه باریزدانه‌اندک	آبرفت‌های جوان رودخانه‌ای	۱	
حاوی قطعات در حد قلوه‌سنگ، تیزگوش، دارای سیمان ضعیف	1×10^{-6}	۴۵-۵۰	< ۱۰	۲/۱	درشت‌دانه	تالوس و واریزه	۲	
دارای سیمان ضعیف تا متوسط	1×10^{-7}	۴۰-۴۵	۱۵-۲۰	۲/۱	درشت‌دانه با سیمان رسی- سیلتی ضعیف	پادگانهای آبرفتی جوان و قدیمی	۳	
سرشار از مواد آلی، با ساختار به هم ریخته	1×10^{-7}	۲۰-۲۵	۱۵-۲۰	۱/۸	ریزدانه سیلتی همراه با ماسه	زمین‌های کشاورزی	۴	
حاوی کانی رسی فراوان، عدمتاً خاک‌های جنگلی حاوی مواد آلی، تسلیح خاک توسط ریشه گیاهان	1×10^{-8}	۳۵-۴۰	۴۵-۵۰	۱/۹	رس و سیلت با درشت‌دانه‌اندک	خاک بر جا با سنگ بستر از جنس از سنگ‌های کربناته	۵	
	1×10^{-8}	۳۰-۳۵	۵۰-۶۰	۱/۹	رس و سیلت با درشت‌دانه‌اندک	خاک بر جا با سنگ بستر متشكل از سنگ‌های رسی (شیل، گلسنگ، مارن و سیلتیستون)	۶	
	1×10^{-8}	۳۰-۳۵	۴۵-۵۰	۱/۹	رس و سیلت با درشت‌دانه‌اندک	خاک بر جا با سنگ بستر از جنس سنگ‌های آتشفسانی	۷	

ج- ضخامت پوشش خاک بر روی سنگ بستر

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

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 شکل ۱۱ 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 می‌دهد. نقشه ضخامت خاک حوضه با همین روش در محیط GIS تهیه و در شکل ۸-ت ارائه شده است.



(د)

(ج)

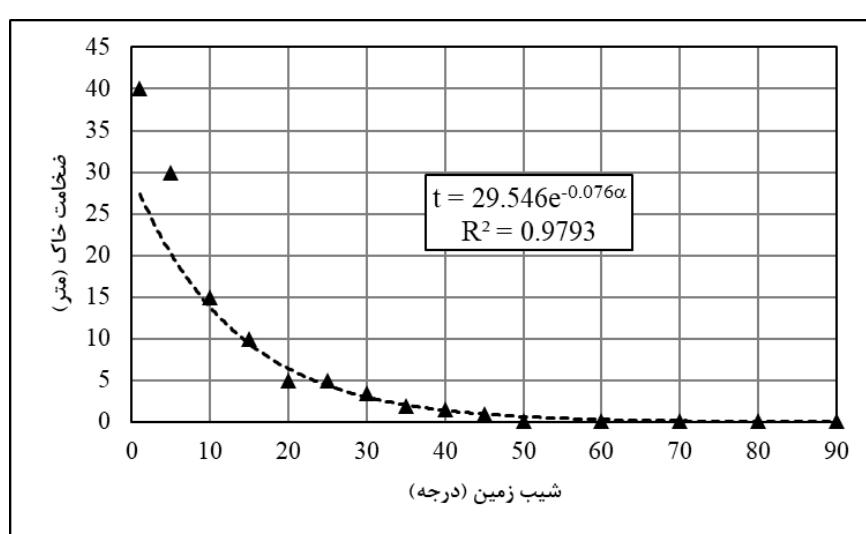
(ب)

(الف)

شکل ۹- نمونه‌ای از عملیات ژئوتکنیکی انجام شده در حوضه 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 حوضه مورد مطالعه

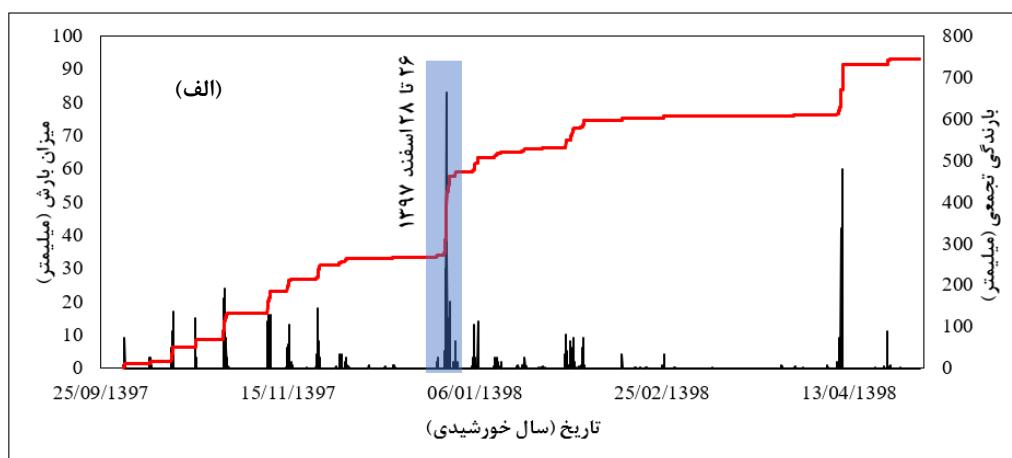


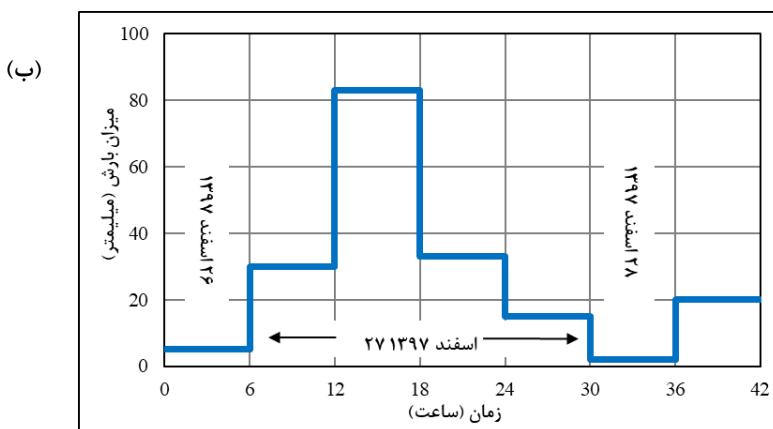
شکل ۱۰- رابطه بین شیب زمین و ضخامت خاک در حوضه مورد مطالعه

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 کننده 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 اینمی 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 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 دوره ۸ ماهه نشان می‌دهد. شکل ۱۲-ب نیز نوسانات ۶ ساعته و شدت بارش مربوط به بارندگی ۲۶ تا ۲۸ اسفند ۱۳۹۷ را در طی ۴۲ ساعت بارش نشان می‌دهد. همانطور که قبلًا اشاره شد، در زمان رخداد این بارندگی شدید و نسبتاً طولانی تعدادی از دامنه‌های طبیعی در حوضه 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 ارائه طرح تثبیت دامنه ناپایدار صورت گرفت، اطلاعات کافی برای سنجش اعتبار تحلیل‌ها نیز در دسترس می‌باشد.





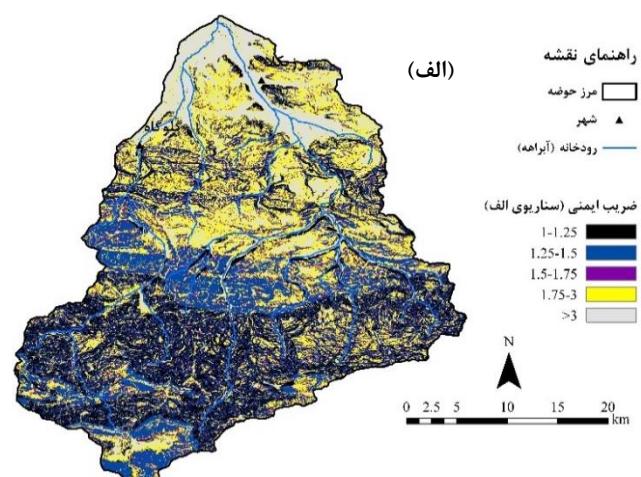
شکل ۱۲- (الف) رخدادهای بارندگی در زمستان ۱۳۹۷ تا تابستان ۱۳۹۸ در حوضه مطالعه؛ (ب) بارندگی رخداده در تاریخ ۲۶ اسفند ۱۳۹۷ تا ۲۸ آبان ۱۳۹۷ (بر اساس آمار ثبت شده در ایستگاه قراخیل)

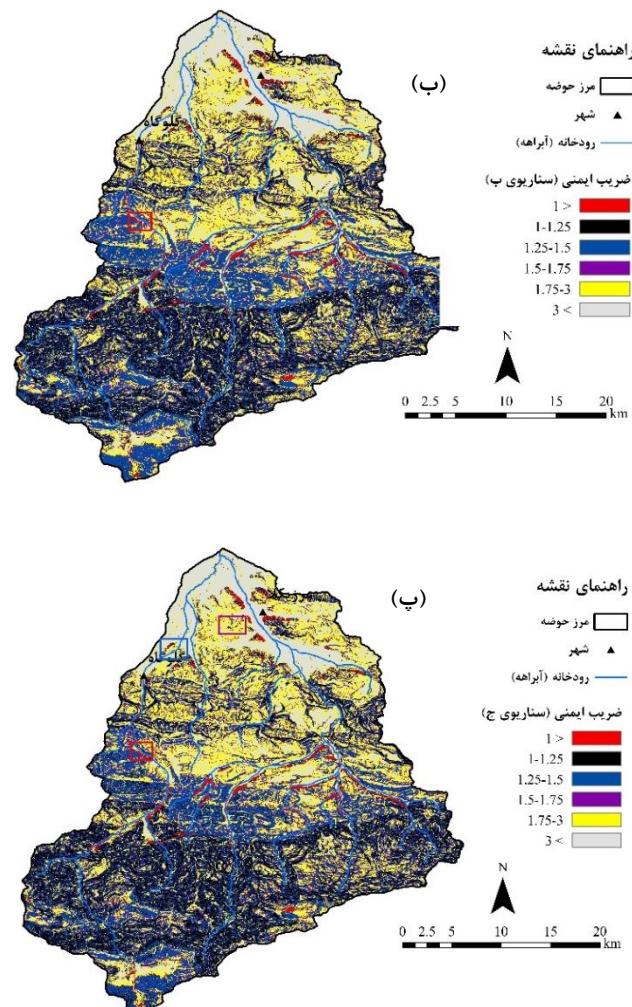
شرح و تفسیر نتایج

- محاسبه 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 متنی سازگار با فرمت ورودی برنامه تریگرز، پارامترهای زیر با اجرای برنامه تریگرز برای هر سلول مجزا، بعد از گذشت زمان مدد 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.

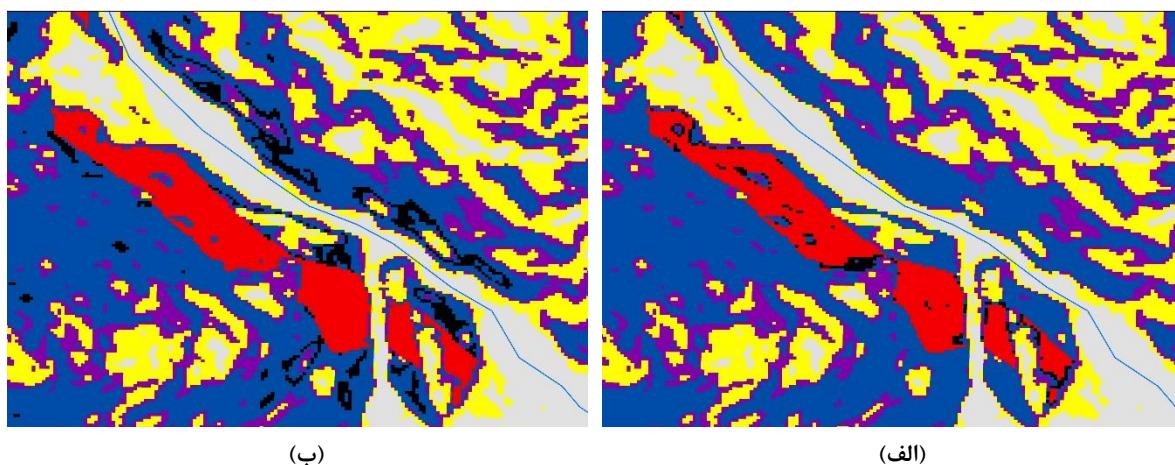




شکل ۱۳- تغییرات مکانی ضریب ایمنی حداقل در حوضه آبخیز مورد مطالعه برای شرایط مختلف؛ (الف) بعد از گذشت ۶ ساعت از شروع بارش مینا؛ (ب) بعد از گذشت ۱۲ ساعت از شروع بارش مینا و (ج) بعد از گذشت ۱۸ ساعت از شروع بارش مینا

با تبدیل فایل‌های متونی 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 حوضه آبخیز مورد مطالعه، در زمان‌های مختلف از شروع بارندگی مینا (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 بارندگی مینا نشان داده شده است. در نگاه اول این نقشه‌ها شبیه به هم به نظر 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 بزرگنمایی بیشتر به نمایش درآمده است. مقایسه این دو نقشه به خوبی نشان می‌دهد که تغییراتی در ضریب ایمنی پایداری

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

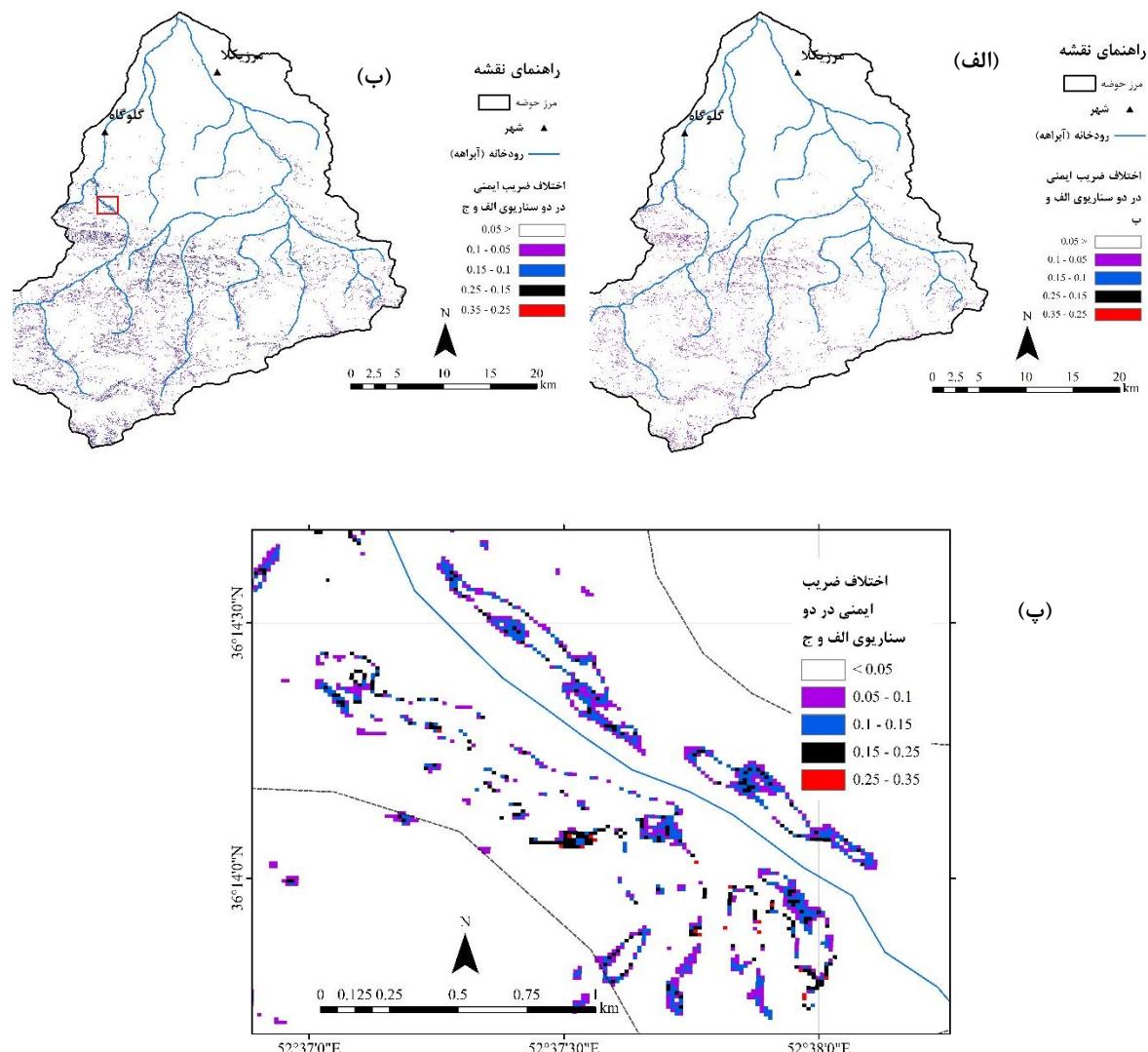


شکل ۱۴- تغییرات مکانی ضریب اینمی حداقل در بخش کوچکی از حوضه آبخیز مورد مطالعه با بزرگنمایی بیشتر؛ (الف) بعد از گذشت ۶ ساعت از شروع بارش (کادر قرمزرنگ در شکل ۱۴-ب)؛ (ب) بعد از گذشت ۱۸ ساعت از شروع بارش

برای بررسی بیشتر این موضوع، در شکل ۱۵-الف اختلاف بین ضرایب اینمی 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 حوزه مورد مطالعه، بررسی نقشه کمی دشوار به نظر می‌رسد. به همین دلیل در شکل ۱۵-پ بخشی از نقشه ارائه شده در شکل ۱۵-ب با بزرگنمایی بیشتر نشان داده شده است. با بررسی دقیق این نقشه‌ها، ملاحظه می‌شود که با گذشت زمان از آغاز بارندگی و افزایش شدت آن برخی از دامنه‌ها بین $۰/۰\text{--}۰/۳$ افت در ضریب اینمی پایداری داشته‌اند.

• مقایسه نتایج تحلیل‌ها با مشاهدات صحرایی

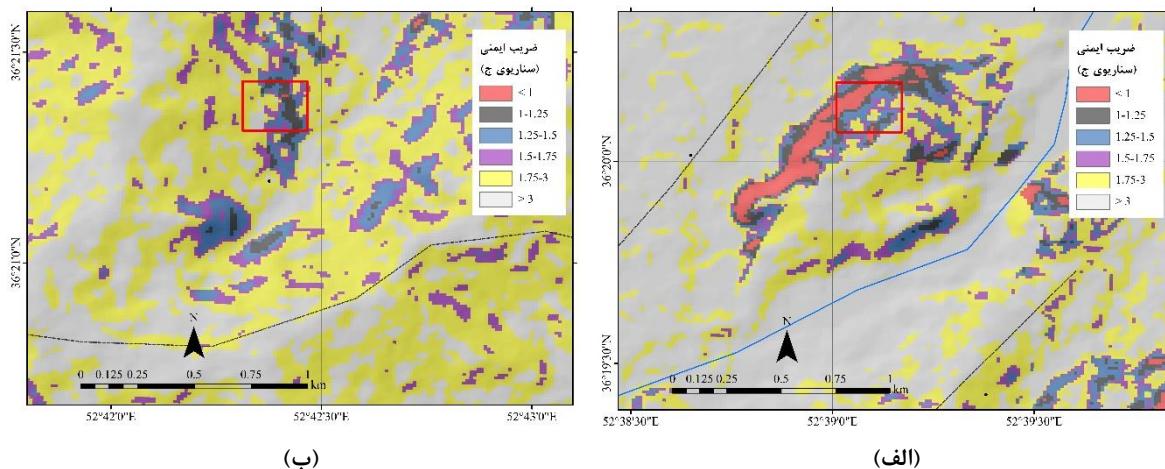
بررسی نقشه‌های ارائه شده در شکل ۱۳ و مقایسه آن با نقشه زون‌های تفکیک شده (شکل ۸-پ) نشان می‌دهد که مقادیر ضریب اینمی در بخش‌های مرتفع و پرشیب زون ۶ کمتر از سایر زون‌های است. بیشترین گسترش ضرایب اینمی نزدیک به ۱ نیز در همین مناطق توزیع یافته‌اند. زون ۶ همانطور که در جدول ۱ نشان داده شده است، متشکل از خاک‌های بر جایی است که حاصل هوازدگی سنگ‌هایی از جنس شیل و مارن هستند. در مطالعات صحرایی نیز مشخص گردید که اغلب زمین‌لغزش‌ها و جریان‌های واریزه‌ای و گلی در خاک‌های 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.



شکل ۱۵- اختلاف ضریب اینمی حداقل در حوضه 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 اینمی 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 صحراوی همخوانی خوبی نشان می‌دهد، به طوری که بعد از وقوع بارندگی‌های طولانی‌مدت، ناپایداری‌های دامنه‌ای از نوع لغزش‌های کم‌عمق و جریان گلی‌واریزهای در بخش‌های مرتفع حوضه بیشتر از سایر نقاط اتفاق می‌افتد. البته لازم به ذکر است که اینگونه زمین‌لغزش‌ها به دلیل عدم وجود جاده دسترسی مناسب، صعب‌العبور بودن و غیرمسکونی بودن این بخش‌ها، وسعت و عمق 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 بالهمیت در نظر گرفت. نکته دیگری که از بررسی این نقشه‌ها قابل استنتاج است، این

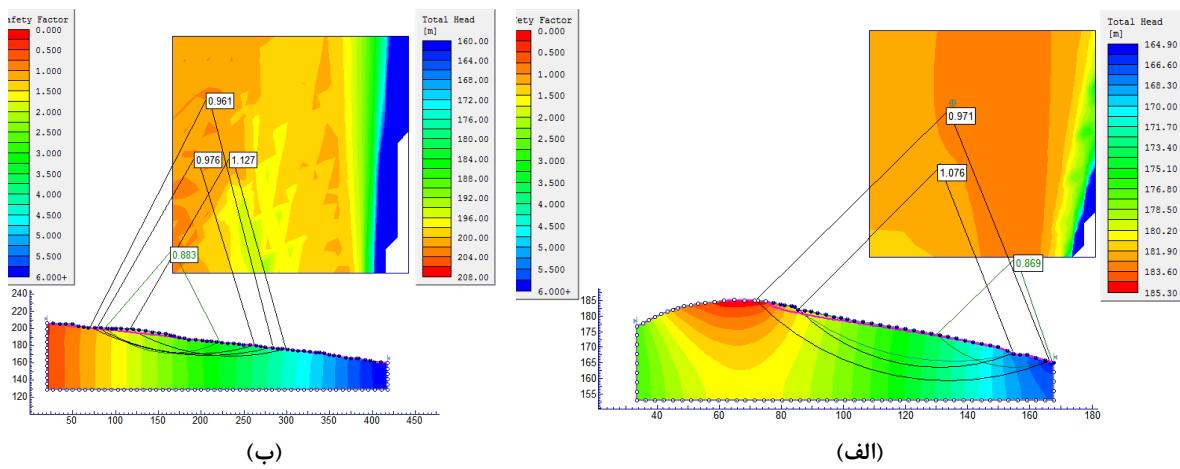
است که در اغلب دامنه‌های طبیعی حوضه مورد مطالعه حتی بعد از بارندگی‌های طولانی مدت و با شدت بالا، افت ضریب ایمنی ناچیز است و فقط در تعداد کمی از دامنه‌ها (یا سلول‌های نقشه) این افت قابل توجه است و باعث کاهش ضریب ایمنی به کمتر از ۱ و در نتیجه ناپایدار شدن دامنه می‌گردد. این موضوع نیز با بررسی‌ها و مشاهدات صحرایی همخوانی دارد و در بارندگی‌هایی مانند بارندگی مینا 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 مینا 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 مطالعه دقیق قرار گرفتند. از جمله می‌توان به دو زمین‌لغزش رخ داده در دو روستای ارکا و ازارسی اشاره نمود (پژوهشکده سوانح طبیعی، ۱۳۹۸‌الف و ب) که باعث خسارات قابل توجهی شدند. در شکل ۱۶-الف و ب موقعیت این زمین‌لغزش‌ها بر روی نقشه تغییرات مکانی ضریب ایمنی حداقل بعد از گذشت ۱۸ ساعت از شروع بارش مینا، با بزرگنمایی بالا نشان داده 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.



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

مطالعه دقیق این زمین‌لغزش‌ها نیز نشان داد که بارندگی و اشباع شدن دامنه اثر قابل توجهی 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 پژوهشکده سوانح طبیعی ارائه شده است، در حالت اشباع و برای گسیختگی‌های دایره‌ای کم‌عمق در شکل ۱۷-الف و ب نشان داده شده است.



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 فاصله زمانی شروع بارش در یک بارندگی مبنا با موقعیت لغزش‌های کم‌عمق و جریان‌های گلی-واریزهای در یک حوضه آبخیز نسبتاً وسیع مورد بررسی قرار گیرد. نتایج این مطالعه همخوانی قابل قبولی با تجارب حاصل از بررسی‌های میدانی در زمینه موقعیت لغزش‌های ناشی از بارندگی در حوضه مورد مطالعه نشان می‌دهد. نتایج این مطالعه از بررسی‌های میدانی در زمینه موقعیت لغزش‌های ناشی از افزایش درصد رطوبت نیز در همین 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 ضریب 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 تندرسترش دارد، و هنگامی که بارندگی‌های طولانی مدت باشد زیاد رخ می‌دهند، به موقعیت پیوندنده. این مطالعه نشان داد که ترکیبی از عواملی مانند جنس خاک و شیب حوضه به عنوان عوامل ذاتی و مقدار بارندگی به عنوان عامل محرك، کنترل‌کننده لغزش‌های کم‌عمق در حوضه 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 موقعیت لغزش‌ها، 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 رخ داده، در تحلیل‌ها نادیده گرفته می‌شود و روش‌های مرسوم پهنه‌بندی از این نظر دارای نقص هستند. همچنین، معیار پهنه‌بندی در این مطالعه ضریب ایمنی پایداری شبیه است که برخلاف سایر شاخص‌هایی که در روش‌های دیگر استفاده می‌شوند، معیاری مناسب‌تر برای ارزیابی پایداری شبیه‌ها محسوب می‌شود.

نقشه‌های توزیع ضریب ایمنی تهیه شده در این مطالعه، 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 کم عمق و جریان‌های واریزهای-گلی) و زمان وقوع آنها را با توجه به میزان و شدت بارندگی پیش‌بینی نمود. تهیه این‌گونه نقشه‌ها با مقیاس‌های بزرگ‌تر و دقیق‌تر و با انجام مطالعات کامل‌تر زمین‌شناسی، زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیکی برای زیرحوضه‌های مهمی که در آنها طرح‌های توسعه 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

- پژوهشکده سوانح طبیعی (۱۳۹۸) گزارش مطالعات مطالعات پایدارسازی روستای ازارسی در برابر خطر زمین‌لغزش (شهرستان بابل، استان مازندران)، منتشر نشده.
- پژوهشکده سوانح طبیعی (۱۳۹۸) گزارش مطالعات مطالعات پایدارسازی روستای ارکا در برابر خطر زمین‌لغزش (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*, ۶۳۰: ۱۵۲۸–۱۵۴۳. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.310>
- 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 ۰۲-۰۴۲۴.
- 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 ۲۰۰۸-۱۱۰۹.
- 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): ۱-۲۶.
- Brabb, E. and B., Harrod. ۱۹۸۹. *Landslides: Extent and Economic Significance*, A. A. Balkema Publisher, Rotterdam: ۳۸۰.
- 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* ۴۶, W۰۵۰۸.
- 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/10.3390/geosciences12010018>
- 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: ۴۴۳–۴۰۰.
- Dietrich, W.E.; R., Reiss, M.L., Hus and D.R., Montgomery. ۱۹۹۰. A process-based model for colluvial soil depth and shallow landsliding using digital elevation data. *Hydrological Processes* ۹: ۳۸۳–۴۰۰.
- Freeze, R.A. and J.A. Cherry. ۱۹۷۹. *Groundwater*, ۶۰۴ 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. ۲۰۱۶. 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, ۷۲: ۸۷۷-۸۹۰.
- Iverson, R.M. ۲۰۰۰. Landslide triggering by rain infiltration: Water Resources Research, ۳۶(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): ۳۲۰-۳۳۹.
- Liu, C.N. and C.C., Wu. ۲۰۰۸. Mapping susceptibility of rainfall-triggered shallow landslides using a probabilistic approach, Environ Geol, ۵۰(۶): ۹۰۷-۹۱۰.
- Morgenstern, N.R. ۱۹۹۲. The evaluation of slope stability – A ۲۰-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): ۲۵۴۷-۲۵۵۸.
- 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. ۲۰۰۶. Modeling regional initiation of rainfall-induced shallow landslides in the eastern Umbria Region of central Italy. Landslides, ۳(۳): ۱۸۱-۱۹۴. <https://doi.org/10.1007/s10248-006-0037-2>.
- Saulnier, G.M.; K.J., Beven and C., Obled. ۱۹۹۷. Including spatially variable effective soil depths in TOPMODEL. Journal of Hydrology ۲۰۲: ۱۰۸-۱۷۲.
- 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. ۲۰۰۴. 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: ۲۳-۳۶.
- Schilirò, L.; C., Esposito and G., Scarascia Mugnozza. ۲۰۱۰. 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, 10(9), 2091-2109.
- Schilirò, L.; J., Cepeda; G., Devoli and L., Piciullo. ۲۰۱۱. Regional analyses of rainfall-induced landslide initiation in upper gudbrandsdalen (South-eastern Norway) using TRIGRS model. Geosciences (Switzerland), 11(1): 1-15.
- 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, 27: 753-762.
- Tarboton, D.G. ۱۹۹۷. A new method for the determination of flow directions and contributing areas in grid digital elevation models: Water Resources Research, 33(2): 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, 77(6). <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7436-0>.
- 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, 18 (2) - May ۲۰۱۷