

## تاثیر توام بارش و جاده بر پایداری شیب‌های خاکی

### مقاله علمی - پژوهشی

علی رضائی، دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران  
مسعود رابطی مقدم\*، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران  
مهدی زمانی لنجانی، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران  
حسین منتصری، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: [rabeti@yu.ac.ir](mailto:rabeti@yu.ac.ir)

دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۱۰ - پذیرش: ۱۴۰۲/۰/۲۵

صفحه ۳۱۲-۲۹۵

### چکیده

دامنه‌ها یکی از اصلی‌ترین بخش‌های محیط‌زیست بوده که زیستگاه جانداران متعددی می‌باشند. سالانه برخی از دامنه‌ها در حین بارندگی ناپایدار می‌شوند. در این میان، دامنه‌های مشرف به جاده پتانسیل بیشتری برای لغزش در حین بارش دارند. از این رو، مسئله پایداری شیب‌های خاکی در برابر بارش و جاده‌سازی از چالش‌های مورد بحث در طراحی و اجرای پروژه‌های راهسازی می‌باشد. در مطالعه حاضر، اثر توام بارش و جاده بر پایداری شیب‌های خاکی از طریق یک مطالعه پارامتری بررسی شده است. برای ارزیابی تاثیر بارش و جاده بر پایداری شیب از نرم‌افزارهای  $SEEP/W$  و  $SLOPE/W$  استفاده شده است. در این مطالعه، اثر بارش با شدت‌های مختلف روی شیب بدون جاده و با وجود جاده بررسی شد. طبق نتایج، احداث جاده بسته به محل قرارگیری آن در شیب می‌تواند منجر به کاهش و یا افزایش ضریب اطمینان اولیه و ثانویه در حین بارش در شیب شود. زاویه شیب و شدت بارش تاثیر مستقیم بر روی جبهه تراوش و فشار آب منفذی دارند. با افزایش شدت و زمان بارش، جبهه تراوش، فشار آب و سطح آب زیرزمینی افزایش یافته و ضریب اطمینان کاهش می‌یابد. با بررسی اثر توام بارش و جاده در یک شیب مشرف به جاده واقعی مشاهده شد که احداث جاده در شیب باعث کاهش ضریب اطمینان اولیه شد. همچنین کاهش شدیدتر ضریب اطمینان شیب در حین بارش نسبت به حالت بدون وجود جاده را در پی داشت. یافته‌های مطالعه حاضر لزوم در نظر گرفتن اثر توام جاده و بارش را در حین تحلیل‌های پایداری شیب نشان می‌دهد که می‌تواند منجر به کاهش زمین لغزش‌های مشرف به جاده گردد.

واژه‌های کلیدی: بارش، جاده، شیب خاکی، پایداری شیب، ضریب اطمینان

### ۱- مقدمه

مبحث، جاده‌سازی نامناسب در اطراف دامنه‌ها است. هنگام بارش، دامنه‌ها ذاتاً آب را بر روی خود عبور می‌دهند. اما زمانی که بشر دامنه‌ای را برای احداث جاده دستخوش تغییر قرار می‌دهد ضریب اطمینان دامنه کاهش می‌یابد و این دامنه قادر به عبور آب و حفظ پایداری خود در هنگام بارش نخواهد بود. عدم عبور آب باران و نفوذ آن به درون دامنه‌ها باعث افزایش فشار آب منفذی، کاهش تنش موثر و در نهایت کاهش مقاومت برشی شیب می‌شود. با نفوذ جریان آب به درون دامنه‌ها سطح

افزایش جمعیت و ضرورت ایجاد مسیرهای حمل و نقل، بشر را وادار به دستکاری در طبیعت کرده است. شواهد علمی متعددی به وجود اثرات منفی رفتارهای انسانی بر طبیعت و پایداری دامنه‌ها پرداخته‌اند. طبق تحقیقات (کریستو و همکاران، ۲۰۱۷) دامنه‌ها به طور طبیعی پایدار بوده و در برابر حوادث طبیعی ناشی از بارش و زمین لغزش پایدار هستند. اما با انجام فعالیت‌های مخرب انسانی ضریب اطمینان آن‌ها کاهش یافته و در نهایت ناپایدار می‌شوند. یکی از جنبه‌های موجود در این

آب زیرزمینی بالا آمده و باعث اشباع شدن خاک دامنه و بروز سیل و خرابی شیب می‌شود. این امر منجر به کاهش ضریب اطمینان دامنه و در نهایت ناپایداری آن می‌شود. یکی دیگر از عوامل ناپایداری دامنه‌ها، تغییرات اقلیمی بوده که منجر به تغییر در الگوی بارش می‌شود. طبق مطالعه‌ای که توسط کریستو و همکاران (۲۰۱۷) صورت گرفت فعالیت‌های انسانی منجر به گرم‌تر شدن زمین شده که باعث ایجاد بارش شدیدتر با طول زمان کمتر می‌شوند. پیش‌بینی می‌شود با گذشت زمان دما افزایش یافته، بارندگی شدیدتر شده و دفعات بارش کمتری رخ دهد (استراوج و همکاران، ۲۰۱۷). بنابراین این مطالعه به بررسی تاثیر جاده‌سازی بر پایداری شیب‌ها هنگام بارش، به کمک مدل‌سازی عددی می‌پردازد. دامنه‌ها یکی از اصلی‌ترین بخش‌های محیط‌زیست بوده که زیستگاه جانداران متعددی می‌باشند. با افزایش جمعیت و بوجود آمدن مشکلات حمل‌ونقل بشر را مجبور به دستکاری و تغییر شکل دامنه‌ها جهت احداث جاده کرده است. مسئله‌ی مهم دیگر، رفتار دامنه‌های خاکبرداری شده جهت ساخت جاده در برابر بارندگی می‌باشد. از این رو، پژوهش حاضر به بررسی عددی پایداری شیب‌های خاکی طبیعی مشرف به جاده در حین بارش خواهد پرداخت. برش دامنه موجب تغییر در شیب اولیه و هیدرولوژی زمین می‌شود از طرفی هم شیب تغییر شکل یافته، قادر به عبور کامل جریان بارش به مانند قبل نبوده و پایداری آن دچار مشکل خواهد شد. نفوذ آب باران به درون خاک باعث کاهش پتانسیل مویینی، افزایش فشار آب حفره‌ای، افزایش سطح آب زیرزمینی و نهایتاً ناپایداری در شیب خواهد شد. طبق مطالعه‌ی هازاردس (۲۰۰۹)، بیش از ۹۰ درصد خرابی‌های شیب، مربوط به بارندگی و آب‌های زیرزمینی است.

شی و ان جی (۱۹۹۷) به بررسی تأثیر وقایع مختلف بارندگی، شرایط مرزی و اولیه زمین بر نشست و پایداری شیب در خاک‌های غیراشباع پرداخته‌اند. طبق نتایج، اگر شیبی دارای سطح آب اولیه کمی باشد و تحت بارندگی شدید قرار گیرد باز هم پایدار خواهد ماند. بنابراین بارندگی‌های پیشین و سطح آب اولیه دامنه، تأثیر قابل توجهی در پایداری شیب دارند.

کای و اوگای (۲۰۰۴) به بررسی تاثیر پتانسیل مویینی و سطح آب‌زیرزمینی بر پایداری دو شیب GCL (خاک رس شهر گلندیل) و USS (ماسه سیلتی شهر آیلند) پرداخته‌اند. طبق

نتایج، مقاومت برشی ناشی از مکش ماتریک، ضریب اطمینان دامنه‌ها را افزایش می‌دهد و هرچه زمان بارش بیشتر باشد خاک کمتر اشباع شده و دیرتر ناپایدار می‌شود. چن و همکاران (۲۰۰۸) به بررسی روشی برای پایداری شیب در برابر تراوش اشباع و تراوش غیر اشباع باران پرداخته‌اند. طبق نتایج، در نفوذ اشباع، ماتریک ساکشن کاهش و فشار آب منفذی هم‌زمان افزایش می‌یابد. این امر موجب بالآمدن سطح آب‌زیرزمینی و ناپایداری شیب می‌شود. درحالی‌که در نفوذ غیراشباع ماتریک ساکشن بدون ایجاد فشار آب منفذی، کاهش می‌یابد. رهااردجو و همکاران (۲۰۱۰) به بررسی تأثیر سطح آب زیرزمینی و جنس خاک بر پایداری شیب هنگام بارندگی پرداخته‌اند. در این مطالعه از سه موقعیت سطح آب زیرزمینی مرطوب، معمولی و خشک و چهار شدت بارندگی متفاوت ۹، ۲۲، ۳۶ و ۸۰ میلی‌متر در ساعت در تجزیه و تحلیل عددی استفاده شد. طبق نتایج شیب بوکیت تیمه دارای خاک درشت دانه و نفوذپذیری بیشتری نسبت به شیب جورونگ می‌باشد. در نتیجه، ضریب اطمینان این شیب با افزایش شدت بارندگی زودتر از شیب جورونگ کاهش می‌یابد. حسین و همکاران (۲۰۱۳) به بررسی تأثیر حوادث بارندگی با شدت و مدت متفاوت، در ساخت شیب دارای خاک رس مشکل‌دار پرداخته‌اند. در این مطالعه ضریب اطمینان برای دامنه از یک تا هفت روز بارندگی با استفاده از نرم‌افزار پلکسیس ارزیابی شده‌است. طبق نتایج، تغییر در الگوی بارندگی می‌تواند شرایط مرزی مانند نفوذ، تبخیر و تعرق را تغییر دهد و بر فشار آب خاک تأثیر بگذارد. همچنین افزایش فشار آب منفذی، کاهش تنش موثر و مقاومت برشی خاک، باعث افزایش تنش برشی در مقابل کاهش مقاومت برشی شیب می‌شود. ابراهیمی و همکاران (۱۳۹۳) این مطالعه به بررسی نقش جاده‌سازی در وقوع لغزش‌های سطحی در دامنه‌های طبیعی با استفاده از مدل‌سازی پایداری دامنه پرداخته‌اند. در این مطالعه، ابتدا هفت دامنه لغزشی مشرف به جاده تعیین شدند. سپس پارامترهای تحلیل پایداری شیب با مطالعات میدانی، نمونه‌برداری از خاک و تجزیه و تحلیل توپوگرافی دامنه‌ها استخراج شدند. در ادامه، برای تعیین ضریب اطمینان پایداری دامنه‌ها، این پارامترها در مدل تحلیل پایداری شیب وارد و ضریب اطمینان برای هر دامنه با نرم‌افزار فلک اسلپ به دست آمد. طبق نتایج، تخریب دامنه جهت احداث جاده باعث کاهش طول شیب و افزایش

برای شیب با خاک سست، افزایش فشار آب‌منفذی در مقایسه با دامنه‌های با شرایط خاک متوسط و متراکم برای تمام شدت بارندگی بیشتر است. هیچ تغییر عمده‌ای در فشار آب‌منفذی برای شیب با شرایط خاک متراکم به دلیل نفوذپذیری و تخلخل کم مشاهده نمی‌شود. برای شدت بارندگی ۰/۱ سرعت کاهش ضریب‌اطمینان برای شیب، به ترتیب خاک متوسط، خاک سست و خاک متراکم می‌باشد.

کریستو و همکاران (۲۰۱۷) به بررسی تغییرات الگوی بارش در دو ایستگاه هواشناسی سلنار و پایالبار و تأثیر آن بر پایداری شیب برای بازه زمانی ۱۹۸۵ تا ۲۰۰۹ در کشور سنگاپور پرداخته‌اند. در این مطالعه فشار آب‌منفذی برای هر دوره بازه زمانی در هر گره از شبکه المان‌محدود در نرم‌افزار سیپ‌دبلیو محاسبه شد. سپس توزیع فشار آب‌منفذی برای هر بار افزایش انتخاب و ضریب‌اطمینان مربوطه با استفاده از نرم‌افزار اسلوپ‌دبلیو صورت گرفت. طبق نتایج، تغییر در الگوی بارندگی می‌تواند شرایط مرزی مانند نفوذ، تبخیر و تعرق را تغییر دهد و بر فشار آب خاک تأثیر بگذارد. افزایش فشار آب‌منفذی، کاهش تنش موثر، کاهش مقاومت برشی خاک باعث افزایش تنش برشی در مقابل مقاومت برشی شیب می‌شود. با افزایش مقدار و شدت بارندگی حوادث رانش زمین به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد.

کریشنا و چاترجی (۲۰۱۹) به بررسی اثر زاویه‌ی شیب بر پایداری دامنه‌های با خاک مختلف در شرایط بارندگی پرداخته‌اند. مدل‌های عددی دو بعدی با سه خاک مختلف که دارای خواص هیدرولیکی و مکانیکی مختلف برای بررسی پایداری دامنه‌های غیر اشباع خاک هستند تهیه شده‌اند. تجزیه و تحلیل نشت به روش المان‌محدود و تجزیه و تحلیل پایداری دامنه‌ها به روش تعادل‌حدی با مدل‌سازی عددی به کمک نرم افزار اسلاید انجام شده‌است. طبق نتایج، هر دو ضریب‌اطمینان اولیه و ۲۴ ساعته با افزایش درجه شیب به صورت غیرخطی کاهش می‌یابند. برای شیب‌های تند، پایداری دامنه‌ها، حاوی خاک با نفوذپذیری بالا بیشتر از دامنه‌های با خاک با نفوذپذیری کم می‌باشند. دامنه‌های هموار با خاک دارای نفوذپذیری کم و زیاد، دارای ضریب ایمنی مشابه می‌باشند.

قانی و همکاران (۲۰۲۰) به بررسی رابطه بین نفوذ بارندگی و پایداری شیب و همچنین برآورد ضریب‌اطمینان براساس نوع و زمان بارش در دامنه‌های گرمسیری پرداخته‌اند. در این مطالعه

شیب دامنه می‌شود. عدم زهکشی مناسب برای تخلیه آب اضافی زیر سطحی دامنه در فرآیند جاده‌سازی، باعث افزایش رطوبت خاک، افزایش فشار آب‌منفذی، افزایش وزن خاک، کاهش چسبندگی و نهایتاً کاهش ضریب‌اطمینان شیب می‌شود. ویت و همکاران (۲۰۱۵) به بررسی تأثیر بارندگی‌های شدید، شرایط اولیه زمین، نفوذپذیری خاک بر تغییرات فشار آب‌منفذی در نوع شیب و تأثیر این تغییرات بر ضریب‌اطمینان پایداری شیب پرداخته‌اند. در این مطالعه اثر بارندگی شدید بر پایداری دامنه‌های بریده شده در شهر ین‌بای ویتنام شمالی مورد بحث قرار گرفته‌است. طبق نتایج، وقتی شدت بارش از ضریب هدایت هیدرولیکی یا نفوذپذیری خاک بالاتر باشد، زمان بارندگی عاملی تعیین‌کننده بر ضریب‌اطمینان پایداری شیب است. برش در دامنه‌ها باعث نفوذپذیری بیشتر دامنه و افزایش فشار آب‌منفذی می‌شود. افزایش فشار آب‌منفذی مقاومت برشی خاک را کاهش می‌دهد و باعث ناپایداری شیب می‌شود. بارش پیشین قبل از حوادث طوفان موجب کاهش ماتریک ساکشن در شیب و افزایش ضریب نفوذ پذیری خاک می‌شود. رهاردجو و همکاران (۲۰۱۶) به بررسی داده‌های بارندگی تاریخی برای درک ویژگی بارش‌های آینده با روش توزیع فرکانس پرداخته‌اند. در این مطالعه منحنی (مدت زمان شدت فرکانس) جدید برای بارندگی در سنگاپور برای شش دوره مختلف (۱۰، ۲۰، ۳۰ دقیقه و ۱، ۲ و ۲۴ ساعت) و شش فرکانس (۲، ۵، ۱۰، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ سال) ایجاد شده‌است. از این منحنی‌ها برای تجزیه و تحلیل تراوش و پایداری شیب برای تعیین تغییر ضریب‌اطمینان دامنه‌های خاک باقیمانده تحت بارش‌های مختلف در سنگاپور استفاده شده‌است. براساس نتایج این مطالعه، ضریب‌اطمینان شیب برای بارش‌های مختلف با زمان کوتاه (۳۰ دقیقه) تقریباً یکسان است. اما با افزایش زمان بارش (۱۰ ساعت) ضریب‌اطمینان کاهش می‌یابد.

چترا (۲۰۱۶) به تجزیه و تحلیل جریان آب گذرنده بر روی خاک اشباع و غیر اشباع بر روی سه شیب دارای خاک سست، متوسط و متراکم پرداخته‌است. در این مطالعه تأثیرات شدت بارش، زمان ایجاد فشار منفذی، درجه اشباع، پایداری شیب و افزایش کرنش برشی در هنگام بارندگی در نظر گرفته شده‌است. سپس به بررسی تأثیر نفوذ باران بر تغییر شکل تدریجی شیب و تشکیل مکانیزم شکست برشی شیب به روش المان‌محدود و با استفاده از نرم‌افزار فلک‌اسلوپ پرداخته شده‌است. طبق نتایج،

در شیب و تغییرات ضریب اطمینان هستند جهت انجام مطالعه انتخاب شدند. جهت اعتبارسنجی مدل عددی، از مطالعه دونگ و همکاران (۲۰۱۹) استفاده شد. در این مطالعات تراوش به کمک نرم افزار SEEP/W مدل شده و پایداری شیب به کمک نرم افزار SLOPE/W انجام شده است. در ادامه مدل سازی این مطالعه انجام شده و نتایج حاصل مقایسه گردیده است.

## ۲-۱- معرفی مدل دونگ و همکاران (۲۰۱۹) و صحت سنجی آن

در این مطالعه تاثیر بارش با سه شدت ۱۰، ۳۰ و ۵۰ میلی متر بر ساعت حین ۱۲۲ ساعت بر شیب خاکی انجام گرفته است. شکل ۱ شیب مورد بررسی در مطالعه دونگ و همکاران (۲۰۱۹) را نشان می دهد.

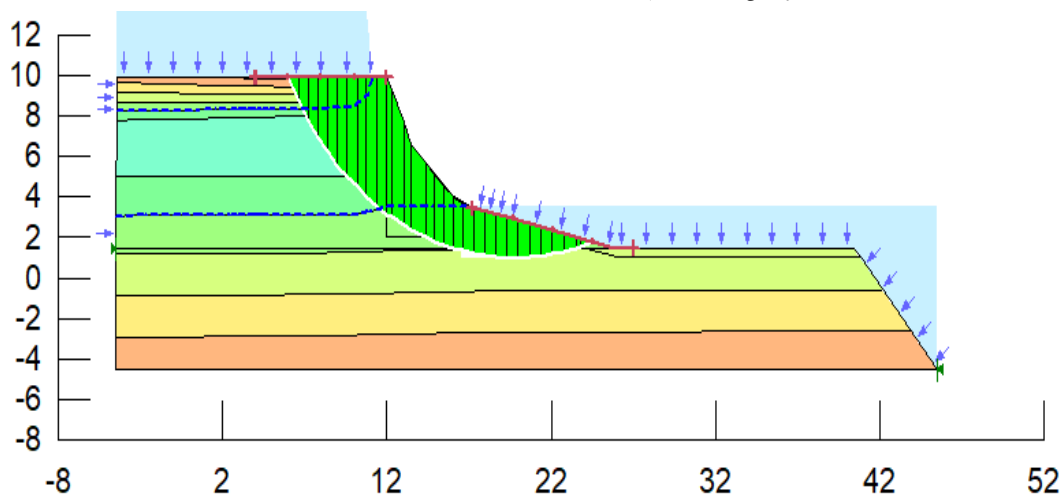
در شکل ۲ مقایسه تغییرات ضریب اطمینان مدل دونگ و همکاران (۲۰۱۹) و مدل سازی حاضر تحت بارش ۱۰ میلی متر بر ساعت قابل مشاهده می باشد.

در شکل ۴ مقایسه تغییرات ضریب اطمینان مدل دونگ و همکاران (۲۰۱۹) و مدل سازی حاضر تحت بارش ۵۰ میلی متر بر ساعت قابل مشاهده می باشد.

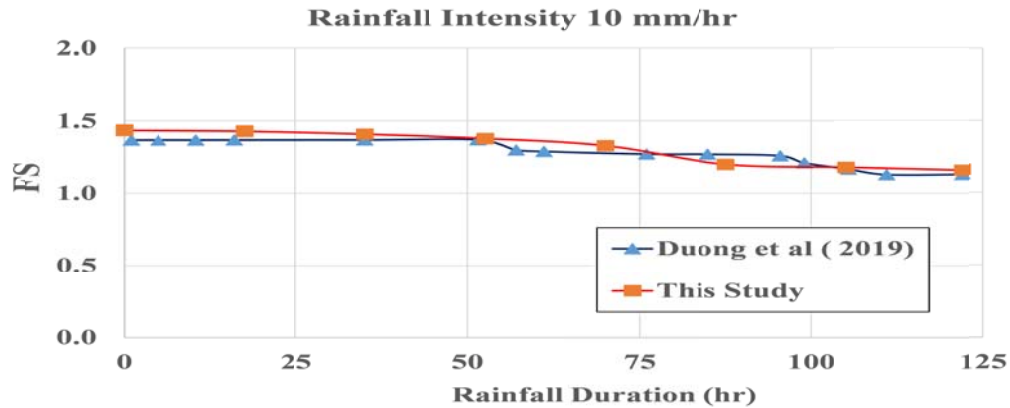
فشار آب منفذی و ضریب اطمینان در طی یک ماه بارش بر اساس پنج سال سابقه تاریخی با استفاده از نرم افزار اسلوپ دبلو و به روش تعادل حدی مدل سازی شده است. طبق نتایج، بالاترین مقدار ضریب اطمینان ۱/۶ و کمترین آن ۰/۴ بوده که نشان دهنده ناپایداری در شیب می باشد. افزایش جمعیت و مشکلات حمل و نقل انسان را ناچار به احداث جاده بر روی دامنه ها کرده است. برش دامنه ها باعث تغییر هندسه اولیه شیب، عدم عبور آب باران و نفوذ آن به درون دامنه ها و نهایتاً بروز سیل و خرابی در دامنه ها می شود. با مرور نتایج مطالعات پیشین در مورد پایداری شیب های خاکی طبیعی مشرف به جاده در حین بارش می توان نتیجه گرفت که دستکاری دامنه موجب تغییر در هیدرولوژی زمین، افزایش فشار آب منفذی، کاهش ماتریک ساکشن و کاهش پایداری آنها در برابر بارش و زمین لغزش شده است. پارامترهایی نظیر شدت بارش، میزان نفوذپذیری، هندسه شیب، سطح آب زیرزمینی، لایه بندی خاک، نفوذپذیری خاک و جنس خاک تاثیر قابل توجهی بر این فرآیند دارد. بنابراین این مطالعه به دنبال مطالعه عددی پایداری شیب های خاکی طبیعی مشرف به جاده در حین بارش می باشد.

## ۲- انتخاب نرم افزار و صحت سنجی آن

با بررسی های صورت گرفته نرم افزارهای SEEP/W و SLOPE/W که قادر به مدل سازی تراوش گذرای آب باران

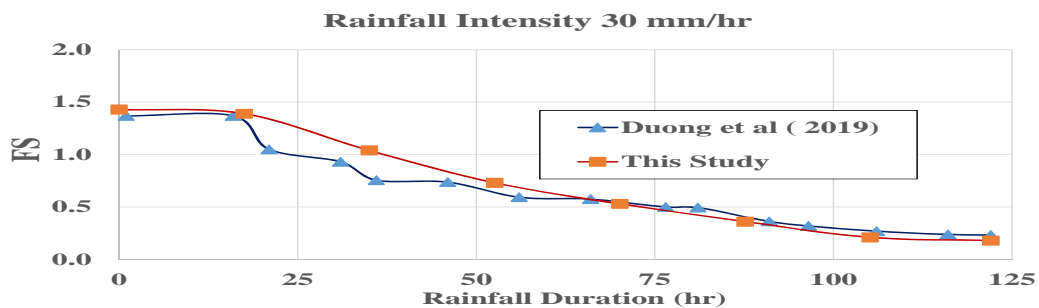


شکل ۱. مدل عددی صحت سنجی، مدل سازی شده در نرم افزار SLOPE/W

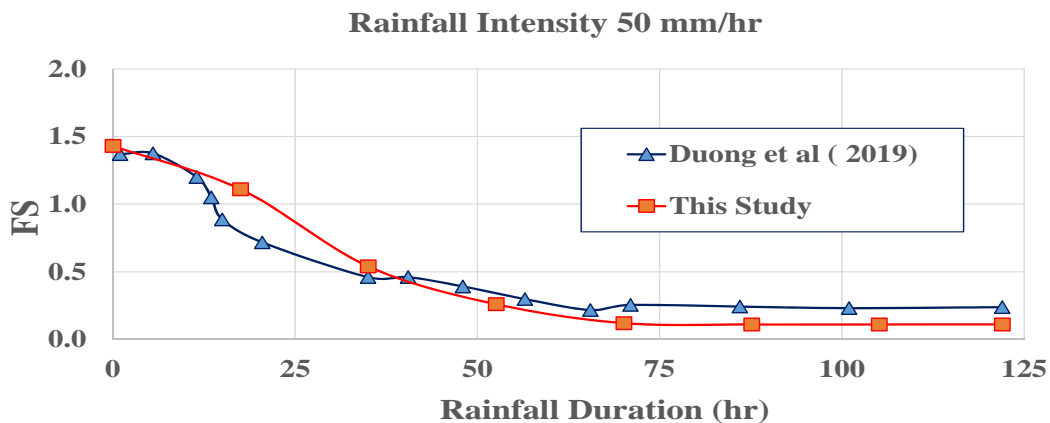


شکل ۲. مقایسه تغییرات ضریب اطمینان مدل دونگ و همکاران (۲۰۱۹) و مدل‌سازی حاضر تحت بارش ۱۰ میلی‌متر بر ساعت

شکل ۳. تغییرات ضریب اطمینان مدل دونگ و همکاران (۲۰۱۹) و مدل‌سازی حاضر تحت بارش ۳۰ میلی‌متر را نشان می‌دهد.



شکل ۳. مقایسه تغییرات ضریب اطمینان مدل دونگ و همکاران (۲۰۱۹) و مدل‌سازی حاضر تحت بارش ۳۰ میلی‌متر بر ساعت



شکل ۴. مقایسه تغییرات ضریب اطمینان مدل دونگ و همکاران (۲۰۱۹) و مدل‌سازی حاضر تحت بارش ۵۰ میلی‌متر بر ساعت

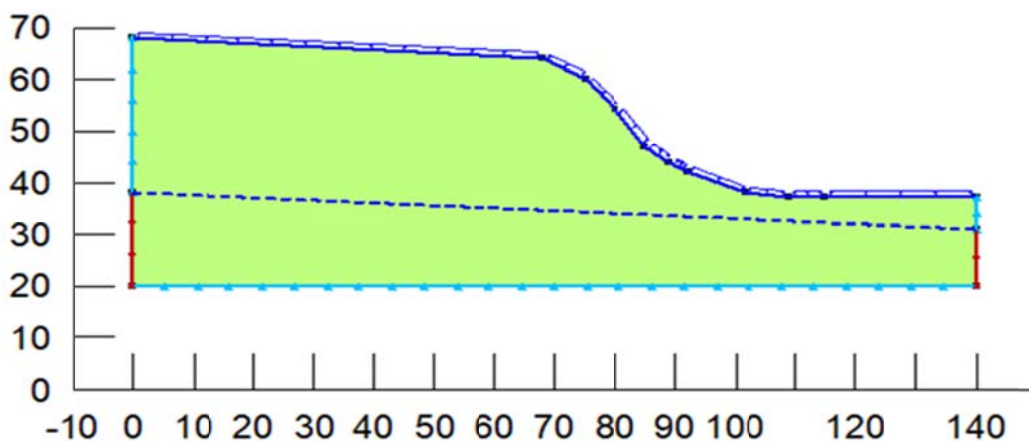
بر اساس مقایسه انجام شده، نرم افزار انتخابی قادر به پیش بینی ضریب اطمینان پایداری شیب در حین بارش با شدت‌های متفاوت است.

### ۳- مطالعه پارامتری و ارائه نتایج

#### ۳-۱- معرفی مدل

درجه می‌باشد. پس از بررسی تاثیر بارش بر شیب بدون جاده، تاثیر بارش بر جاده در بالادست و پایین دست شیب مورد بررسی قرار گرفت.

در راستای انجام مدل‌سازی جاده در شیب ابتدا پایداری شیب بدون جاده در حین بارش مورد بررسی قرار گرفت. در شکل ۵ شیب مورد بررسی در این مطالعه قابل مشاهده می‌باشد. شیب دارای طول ۴۱ متر، ارتفاع ۳۱ متر و زاویه ۴۵



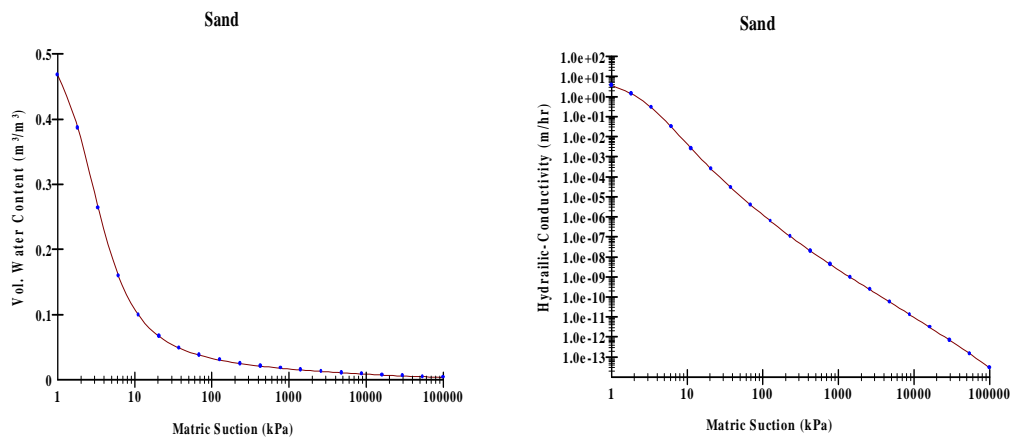
شکل ۵. هندسه شیب مدل شده تحت بارش در مطالعه حاضر قبل از اعمال جاده

در جدول شماره ۱ مصالح و شرایط مرزی به کار رفته در آنالیز پایداری شیب ماسه قابل مشاهده می‌باشد.

جدول ۱. مصالح بکار رفته در آنالیز پایداری شیب ماسه

پارامترها	مقدار (واحد)	
جنس خاک	ماسه	خاک
زاویه اصطکاک داخلی خاک	۳۸ (درجه)	
وزن مخصوص خاک	۲۰ (کیلونیوتن بر متر مکعب)	
معیار شکست برشی خاک	موهر_کولمب	
چسبندگی خاک	۰ (کیلو پاسکال)	
هدایت هیدرولیکی (اشباع)	۳/۶ (متر بر ساعت)	
محتوای آب (اشباع)	۰/۴۶ (متر مکعب بر متر مکعب)	
شدت و مدت زمان بارش	۲، ۴، ۶، ۸، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ میلی‌متر بر ساعت در طی ۲۴ ساعت	بارش
هد بالادست	۳۸ (متر)	آب زیرزمینی
هد پایین دست	۳۱ (متر)	

شکل ۶. تغییرات نفوذپذیری و آب حجمی در برابر مکش ماتریک خاک ماسه در این مطالعه قابل مشاهده می‌باشد.

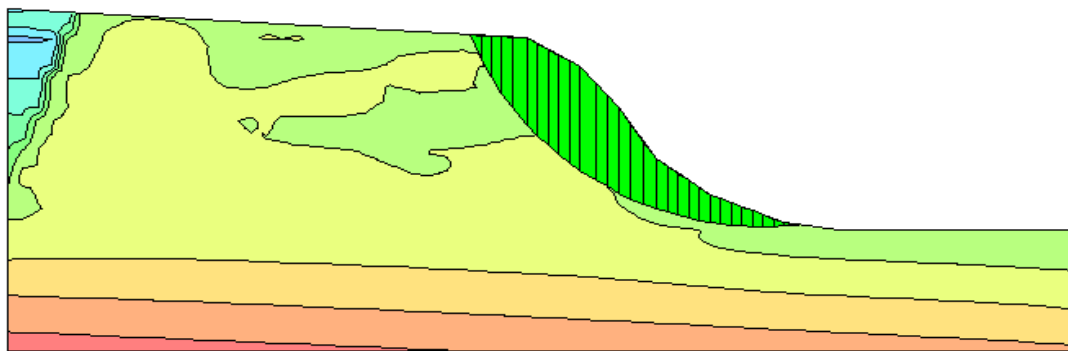


شکل ۶. تغییرات نفوذپذیری و میزان آب حجمی در برابر مکش ماتریک خاک ماسه

### ۲-۳- اعمال بارش روی شیب بدون جاده

گردید. در شکل ۷ گوه گسیختگی بحرانی قبل از بارش در مدل بدون جاده قابل مشاهده می‌باشد.

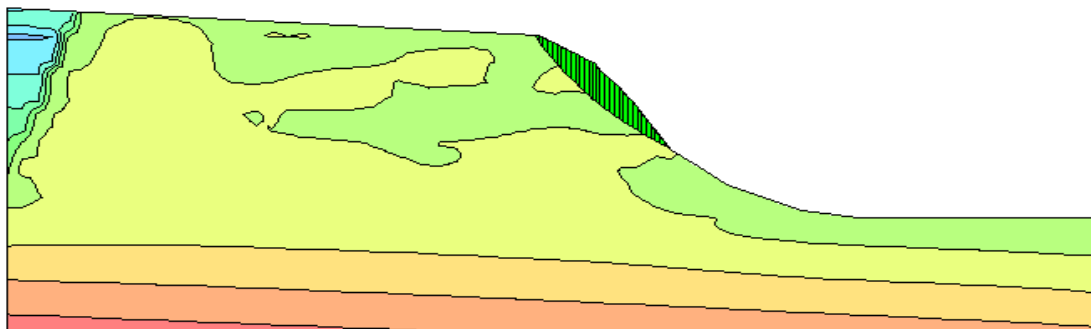
به مدل بدون جاده بارش در مقادیر ۲، ۴، ۶، ۸، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ میلی‌متر بر ساعت طی ۲۴ ساعت اعمال



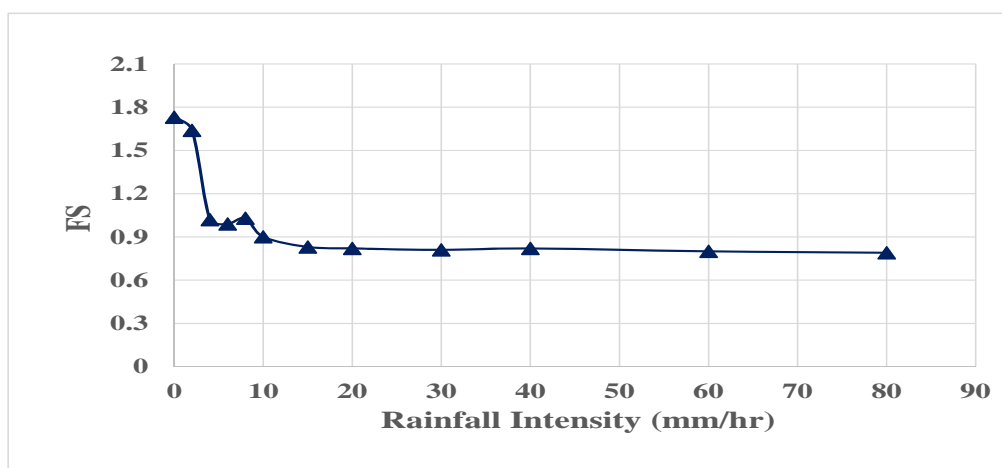
شکل ۷. گوه گسیختگی قبل از بارش در مطالعه حاضر

در شکل ۹ تغییرات ضریب اطمینان در برابر شدت بارش مشاهده می‌شود. ضریب اطمینان اولیه شیب برابر ۱/۷۲ بوده و در اثر اعمال بارش کاهش یافته است.

شکل ۸ گوه گسیختگی پس از ۲۴ ساعت بارش با شدت ۲۰ میلی‌متر بر ساعت را نشان می‌دهد. مطابق شکل بارش باعث تبدیل شدن گوهی بحرانی به گوه‌ای با عمق سطحی‌تر شده‌است.



شکل ۸. گوه گسیختگی پس از ۲۴ ساعت بارش با شدت ۲۰ میلی‌متر بر ساعت در مطالعه حاضر



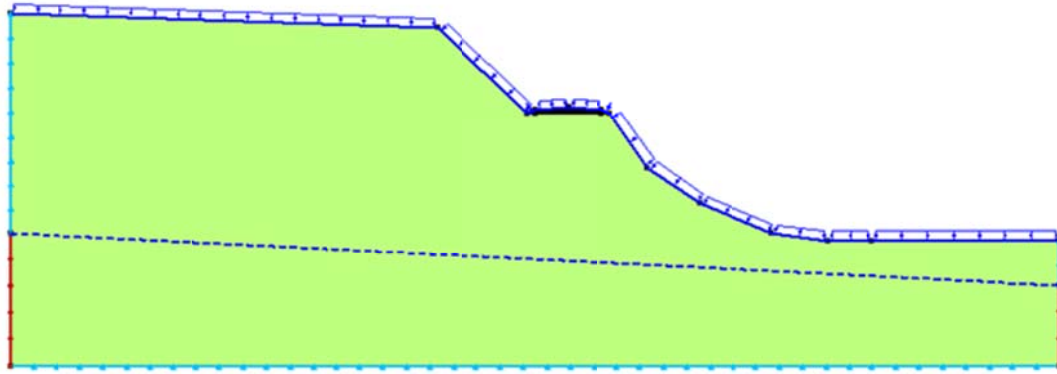
شکل ۹. تغییرات ضریب اطمینان در برابر شدت بارش در حالت شیب بدون جاده

### ۳-۳- اعمال جاده به بالادست شیب (نزدیک به تاج شیب)

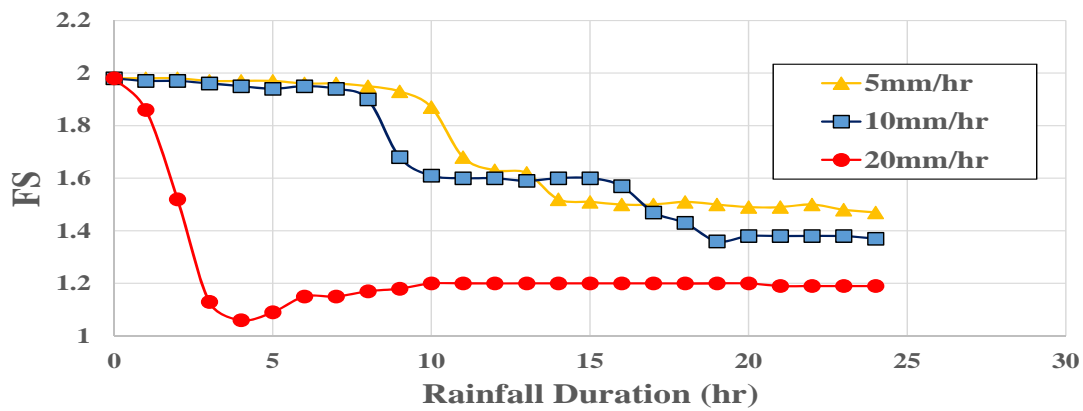
قبل از بارش در مدل بدون جاده  $1/72$  بوده که پس از اعمال جاده در بالادست شیب به  $1/98$  افزایش یافته است در واقع جاده باعث افزایش ضریب اطمینان اولیه در شیب شده است. مطابق شکل، ضریب اطمینان اولیه شیب  $1/98$  بوده که پس از اعمال بارش و جاده کاهش یافته است. با افزایش شدت بارش، ضریب اطمینان با کاهش بیشتری همراه بوده است. اثر توام بارش و جاده باعث کاهش ضریب اطمینان در شیب شده است.

اعمال جاده به شیب در حالت جاده در بالادست شیب تحت ۲۴ ساعت بارش با مقادیر ۵، ۱۰ و ۲۰ میلی‌متر بر ساعت مورد بررسی قرار گرفت. در شکل ۱۰ شرایط مرزی و هندسه اعمال جاده در بالادست شیب قابل مشاهده می‌باشد. در شکل ۱۱ تغییرات ضریب اطمینان اعمال جاده در بالادست شیب تحت بارش با شدت ۵، ۱۰ و ۲۰ میلی‌متر بر ساعت طی ۲۴ ساعت قابل مشاهده می‌باشد. ضریب اطمینان





شکل ۱۰. شماتیک اعمال جاده و شرایط مرزی به بالادست شیب

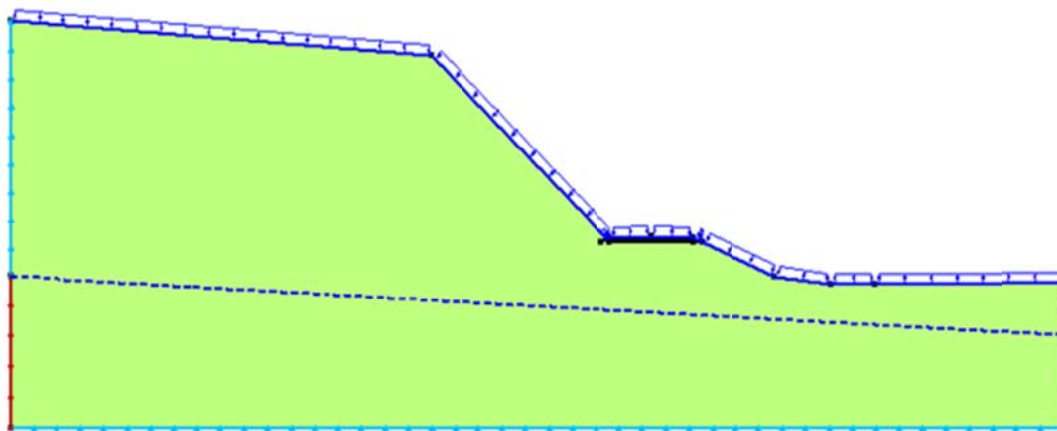


شکل ۱۱. تغییرات ضریب اطمینان جاده در بالادست شیب مطالعه حاضر

### ۳-۴- اعمال جاده به پایین دست شیب (نزدیک به پای شیب)

ساعت مورد بررسی قرارگرفت. در شکل ۱۲ شرایط مرزی و هندسه اعمال جاده در پایین دست شیب قابل مشاهده می‌باشد.

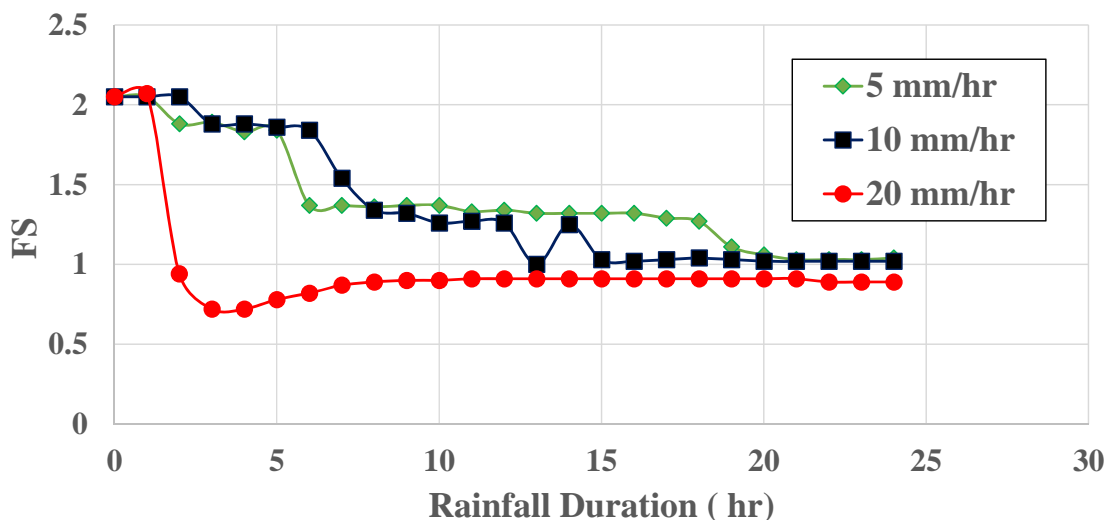
اعمال جاده به شیب در حالت جاده در پایین دست شیب تحت بارش با مقادیر ۵، ۱۰ و ۲۰ میلی‌متر بر ساعت طی ۲۴



شکل ۱۲. شماتیک اعمال جاده و شرایط مرزی به پایین دست شیب

باعث افزایش ضریب اطمینان اولیه در شیب شده‌است. مطابق شکل، ضریب اطمینان اولیه شیب ۲/۰۵ بوده که پس از اعمال بارش و جاده کاهش یافته‌است. اثر توام بارش و جاده منجر به کاهش بیشتر ضریب اطمینان در شیب شده‌است.

در شکل ۱۳ تغییرات ضریب اطمینان اعمال جاده در پایین دست شیب تحت بارش با شدت ۵، ۱۰ و ۲۰ میلیمتر بر ساعت قابل مشاهده می‌باشد. ضریب اطمینان قبل از بارش در مدل بدون جاده ۱/۷۲ بوده که پس از اعمال جاده در پایین دست شیب به ۲/۰۵ افزایش یافته است. در واقع جاده

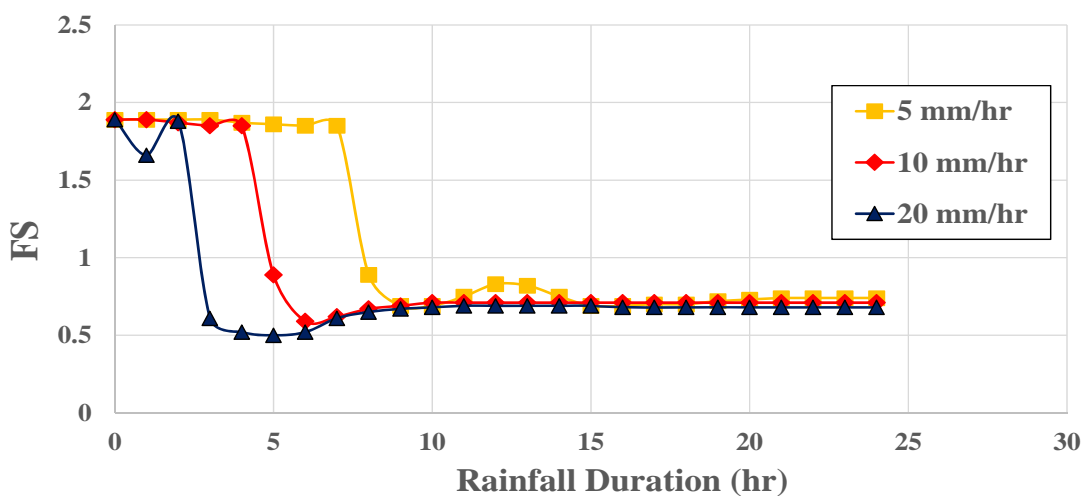


شکل ۱۳. تغییرات ضریب اطمینان جاده در پایین دست مطالعه حاضر

### ۳-۵- اعمال جاده: خاکبرداری با زاویه ۶۰ درجه

در بالادست شیب قابل مشاهده می‌باشد. مطابق نتایج، ضریب اطمینان با زاویه ۶۰ درجه در بالادست شیب ضریب اطمینان کمتری نسبت به مدل مشابه با زاویه ۴۵ درجه دارد در واقع با افزایش زاویه شیب ضریب اطمینان کاهش پیدا کرده‌است.

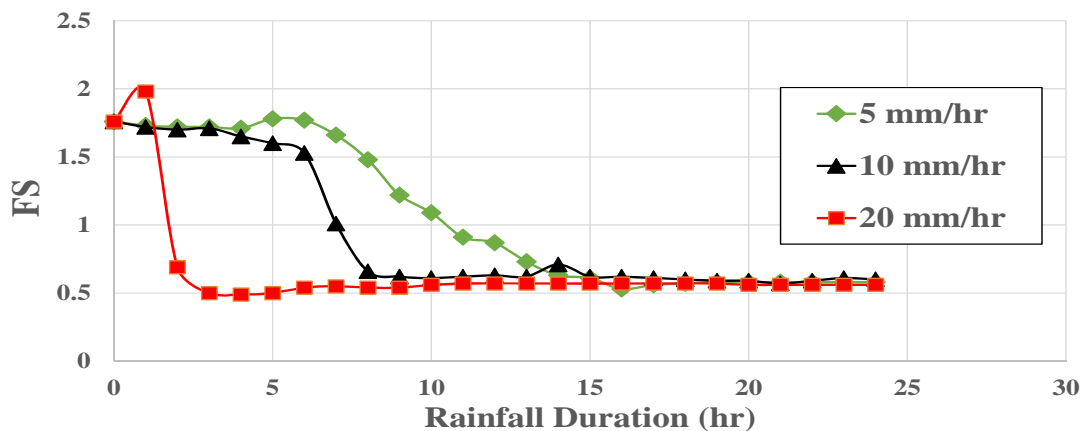
اعمال جاده به شیب در حالت جاده در بالادست و پایین دست شیب تحت بارش با مقادیر ۵، ۱۰ و ۲۰ میلی‌متر بر ساعت طی ۲۴ ساعت مورد بررسی قرار گرفت. در شکل ۱۴ نتایج اعمال جاده در حالت خاکبرداری با زاویه ۶۰ درجه



شکل ۱۴. تغییرات ضریب اطمینان جاده در بالادست در حالت خاکبرداری با شیب ۶۰ درجه

نسبت به مدل مشابه با زاویه ۴۵ درجه دارد. در واقع با افزایش زاویه شیب ضریب اطمینان کاهش پیدا کرده است. با افزایش شدت بارش، ضریب اطمینان کاهش بیشتری یافته است.

در شکل ۱۵ نتایج اعمال جاده با زاویه ۶۰ درجه در پایین دست شیب قابل مشاهده می‌باشد. مطابق نتایج، ضریب اطمینان بازوویه ۶۰ درجه در پایین دست شیب ضریب اطمینان کمتری



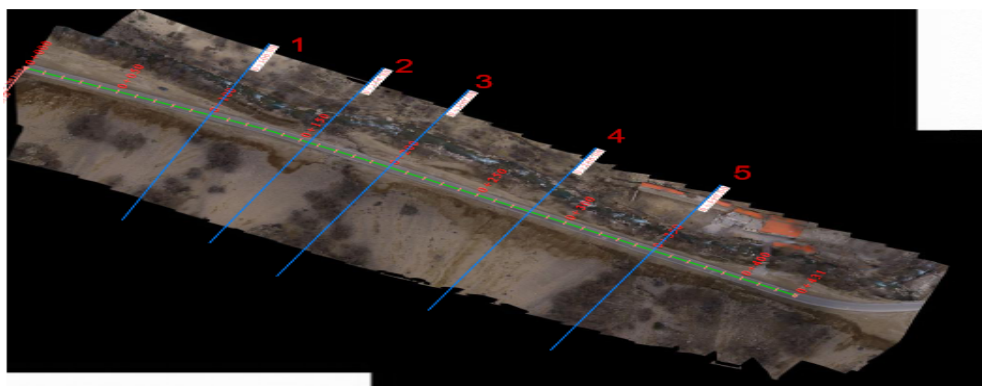
شکل ۱۵. تغییرات ضریب اطمینان جاده در پایین دست شیب مطالعه حاضر

#### ۴- مطالعه موردی جاده یاسوج به کاکان و ارائه نتایج

##### ۴-۱- معرفی مدل

چند مقطع استخراج شده است. در این بخش به بررسی تاثیر توام بارش و جاده در مقطع ۱ خواهد پرداخت. پس از بررسی تاثیر بارش بر شیب حاضر بدون جاده، تاثیر بارش بر جاده مورد بررسی قرار گرفت.

منطقه مورد مطالعه در مسیر محور یاسوج به اقلید (کیلومتر ۶ جاده یاسوج به کاکان، استان کهگیلویه و بویراحمد) قرار دارد. در شکل ۱۶ تصویر هوایی (نقشه توپوگرافی) از موقعیت جاده قابل مشاهده می‌باشد مطابق شکل، مختصات جاده در



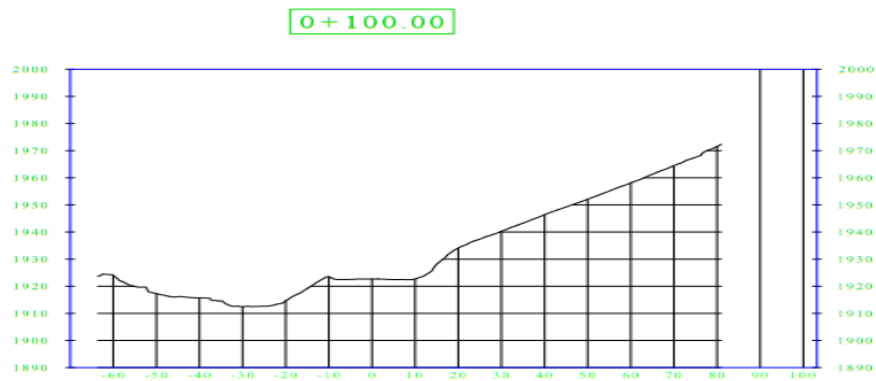
شکل ۱۶. تصویر هوایی از موقعیت جاده در محور یاسوج به کاکان

در شکل ۱۷ تصویر واقعی از شیب جاده در محور مورد مطالعه (یاسوج به کاکان) قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۱۷. تصویر واقعی از شیب جاده در محور یاسوج به کاکان

در شکل ۱۸ مختصات هندسه جاده یاسوج به کاکان در مقطع شماره ۱ قابل مشاهده می‌باشد.

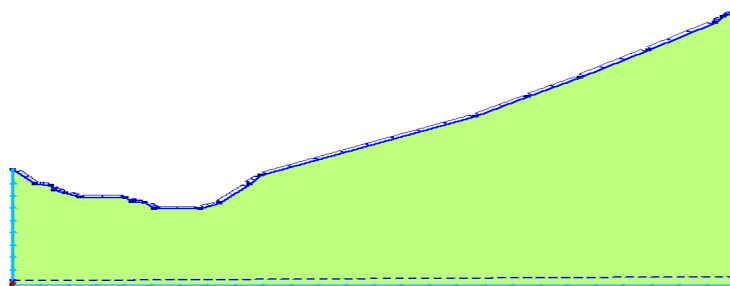


شکل ۱۸. مختصات هندسه جاده یاسوج به کاکان در مقطع شماره ۱

#### ۴-۲- بررسی تاثیر بارش بر روی شیب بدون جاده

(۲ متر)، بارش، منطقه‌ی بدون جریان و سطح آب زیرزمینی قابل مشاهده می‌باشند. شدت بارش برابر ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ میلی‌متر بر ساعت در نظر گرفته شده‌است.

در شکل ۱۹ شیب مورد بررسی قبل از احداث جاده در این مطالعه قابل مشاهده می‌باشد. شیب دارای طول ۴۱/۵۷ متر، ارتفاع ۲۶/۵۲ متر و زاویه ۳۰ درجه می‌باشد. در این مدل شرایط مرزی شامل هد بالادست (۴ متر)، هد پایین دست



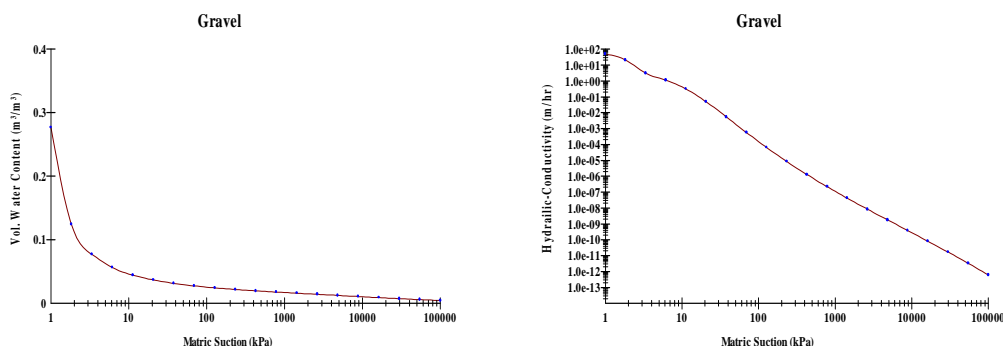
شکل ۱۹. طرح شماتیک شیب مدل شده تحت بارش در این مطالعه

در جدول ۲ مصالح به کار رفته در آنالیز پایداری شیب قابل مشاهده می‌باشد.

جدول ۲. مصالح به کار رفته در آنالیز پایداری شیب

مقدار (واحد)	پارامترها	
شن خوب دانه بندی شده GW	جنس خاک	خاک
۴۰ (درجه)	زاویه اصطکاک داخلی خاک	
۲۰ (کیلو نیوتن بر متر مکعب)	وزن مخصوص خاک	
موهر-کولمب	معیار شکست برشی خاک	
۱ (کیلو پاسکال)	چسبندگی خاک	
۲، ۴، ۶، ۸، ۱۰ (میلی متر بر ساعت)	شدت و مدت زمان بارش	شرایط مرزی
۴ (متر)	هد بالادست	
۲ (متر)	هد پایین دست	
۵۰ (متر بر ساعت)	هدایت هیدرولیکی (اشباع)	
۰/۲۷ (متر مکعب بر متر مکعب)	محتوای آب (اشباع)	

در شکل ۲۰ تغییرات نفوذپذیری و آب حجمی در برابر مکش ماتریک خاک شن در این مطالعه قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۲۰. تغییرات نفوذپذیری و میزان آب حجمی در برابر مکش ماتریک خاک شن

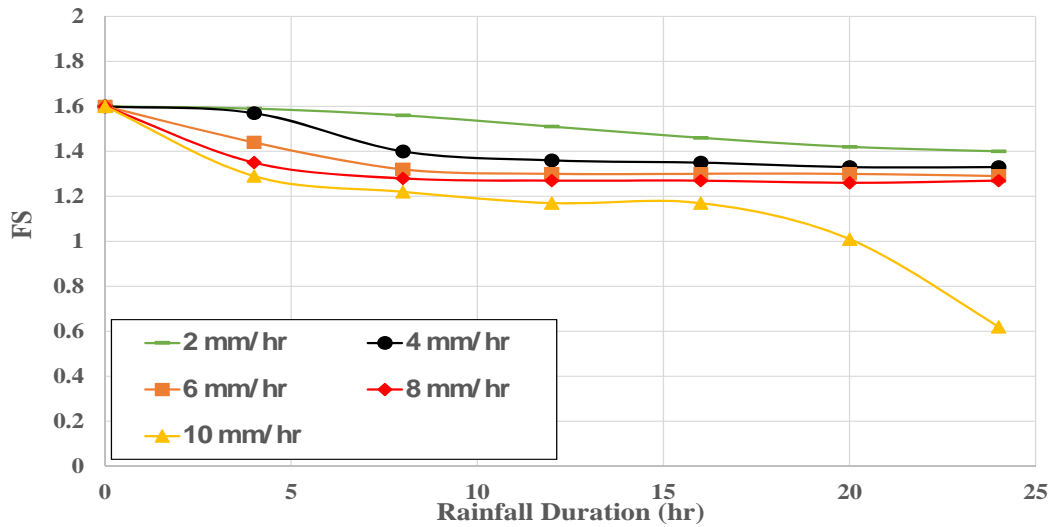
#### ۴-۴- اعمال جاده به شیب

اعمال جاده به شیب تحت ۲۴ ساعت بارش با مقادیر ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ میلی متر بر ساعت مورد بررسی قرار گرفت. در شکل ۲۲ گوه گسیختگی و هندسه اعمال جاده به شیب قابل مشاهده می‌باشد. ضریب اطمینان اولیه شیب برابر ۱/۴ می‌باشد.

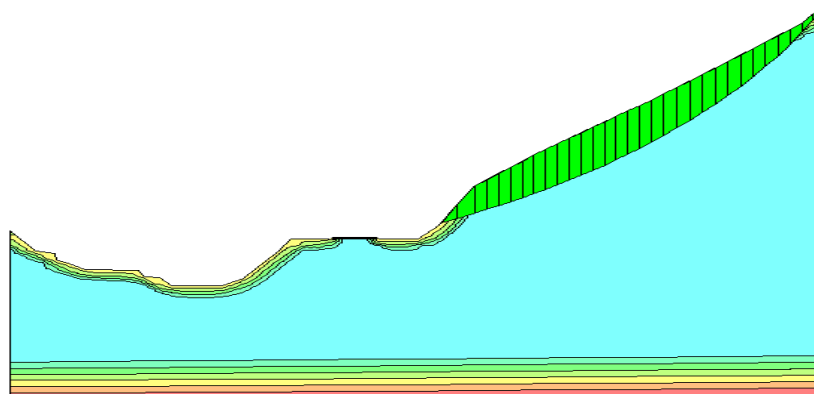
#### ۴-۳- اعمال بارش روی شیب بدون جاده

به مدل بدون جاده بارش در مقادیر ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ میلی متر بر ساعت طی ۲۴ ساعت اعمال گردید. در شکل ۲۱ تغییرات ضریب اطمینان در برابر شدت بارش مشاهده می‌شود. ضریب اطمینان اولیه شیب برابر ۱/۶ بوده و در اثر اعمال بارش کاهش یافته است.

تغییرات ضریب اطمینان در برابر بارش بدون جاده

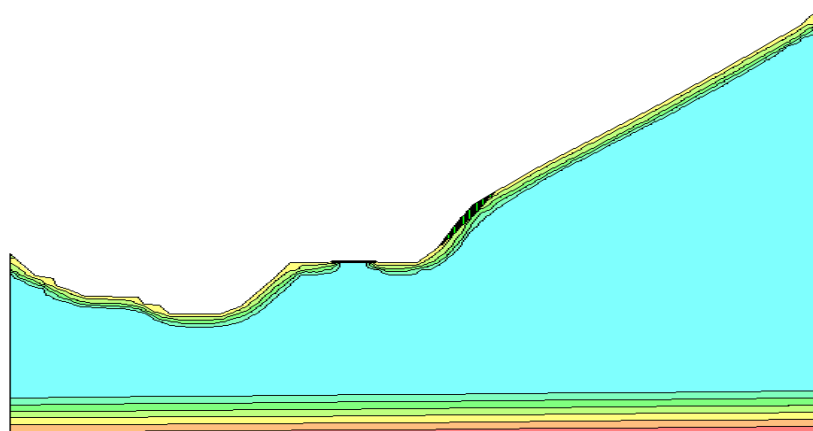


شکل ۲۱. تغییرات ضریب اطمینان در برابر شدت بارش در حالت شیب بدون جاده



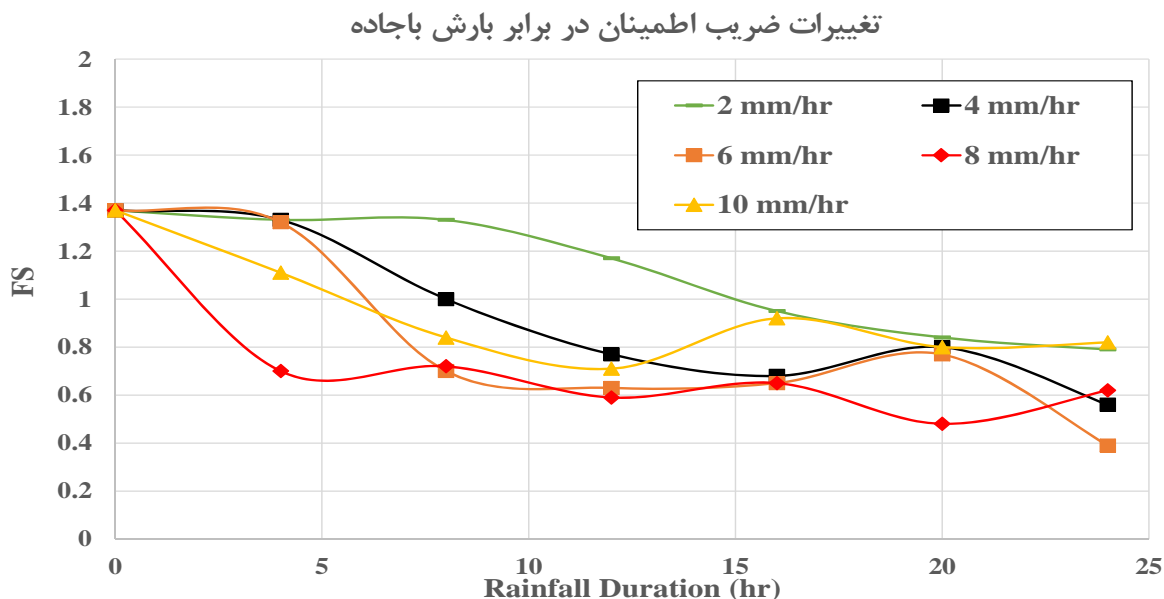
شکل ۲۴. گوه گسیختگی قبل از بارش در مطالعه حاضر

شکل ۲۳ گوه گسیختگی پس از ۲۴ ساعت بارش با شدت ۱۰ میلی متر بر ساعت را نشان می دهد.



شکل ۲۳. گوه گسیختگی پس از ۲۴ ساعت بارش با شدت ۱۰ میلی متر بر ساعت در مطالعه حاضر

در شکل ۲۴ تغییرات ضریب اطمینان در برابر شدت بارش مشاهده می‌شود. ضریب اطمینان اولیه شیب برابر ۱/۴ بوده و در اثر اعمال بارش کاهش یافته است.



شکل ۲۶. تغییرات ضریب اطمینان در برابر شدت بارش در حالت شیب با جاده در شدت بارش‌های ۲ تا ۱۰ میلی‌متر بر ساعت

## ۵- نتیجه‌گیری

و در شرایطی باعث بالآ آمدن سطح آب زیرزمینی و کاهش ضریب اطمینان می‌شود.

- افزایش شیب ترانشه خاکبرداری جاده، باعث تبدیل شدن گوهی بحرانی به گوه‌ای با عمق سطحی و کاهش ضریب اطمینان اولیه و پس از بارش گردد.

- با بررسی اثر توام بارش و جاده در یک شیب مشرف به جاده واقعی مشاهده شد که احداث جاده در شیب باعث کاهش ضریب اطمینان اولیه شد. همچنین کاهش شدیدتر ضریب اطمینان شیب در حین بارش نسبت به حالت بدون وجود جاده را در پی داشت.

- مطالعه حاضر لزوم در نظر گرفتن اثر توام جاده و بارش را در حین تحلیل‌های پایداری شیب نشان می‌دهد که می‌تواند منجر به کاهش زمین لغزش‌های مشرف به جاده گردد.

هدف از پژوهش حاضر، بررسی تاثیر توام بارش و جاده‌سازی بر پایداری شیب‌های خاکی بوده است. این کار در قالب یک مطالعه پارامتری انجام گرفت. برای ارزیابی تاثیر بارش و جاده بر شیب، از نرم‌افزار SEEP/W برای تراوش آب باران به درون خاک و از نرم‌افزار SLOPE/W برای تعیین ضریب اطمینان شیب استفاده شده است. مهم‌ترین نتایج پژوهش حاضر در ادامه آمده است:

- جاده متناسب با محل قرار گیری آن در شیب ممکن است منجر به کاهش و یا افزایش ضریب اطمینان اولیه و پس از بارش در شیب گردد.

- شدت بارش و مدت زمان بارش پارامترهای تاثیرگذار بر ضریب اطمینان پایداری شیب می‌باشند. بارش باعث ایجاد جبهه تراوش، افزایش فشار آب منفذی و کاهش ضریب اطمینان در شیب می‌گردد. تراوش آب باران باعث افزایش ناحیه اشباع

۶- پی نوشت‌ها

1. Cristo et al.
2. Strauch et al.
3. Matric Suction
4. Hazards
5. Shi and Ng
6. Cai and Ugai
7. Glendale Clayey Loam
8. Uplands Silty Sand
9. Chen et al.
10. Rahardjo et al.
11. Hossain et al.
12. PLAXIS
13. FLAC slope
14. Viet et al.
15. Rahardjo et al
16. IDF
17. Chatra
18. Kristo et al.
19. SEEP/W
20. SLOPE/W
21. Krishna and Chatterjee
22. SLIDE
23. Ghani et al.
24. Duong et al.

۷- مراجع

Geotechnics for Sustainable Infrastructure Development. 62, 887-892.

-Che Ghani A., Mohd T., Hasbollah D. (2020). Effect of rainfall pattern on slope stability Geotechnics for Sustainable Infrastructure Development. 62, 887-892.

-Chen X., Guo H. and Song E. (2008). Analysis method for slope stability under rainfall action Landslides and Engineered Slopes. *Taylor and Francis Group, London*, 1507-1515.

-Duan G., Chen D. and Niu R. (2019). Forecasting Groundwater Level for Soil Landslide Based on a Dynamic Model and Landslide Evolution Pattern. 11(10), 1-13.

-Duong, T. T., Do, D.M. and Yasuhara, K. (2019). Assessing the Effects of Rainfall Intensity and Hydraulic Conductivity on Riverbank Stability. *Water 11* (4), 1-16.

-Cai F. and Ugai K. (2004). Numerical Analysis of Rainfall Effects on Slope Stability. 4(2), 69-78.

-Chatra A. S., Dodagoudar G. R. and Maji V. B. (2017). Numerical modelling of rainfall effects on the stability of soil slopes. *International Journal of Geotechnical Engineering*. 13, 425-437.

-Chatterjee D., Krishna A. (2019). Effect of Slope Angle on the Stability of a Slope under Rainfall Infiltration, *Indian Geotechnical Society*. 49, 708-717.

-Chatterjee D., Murali K. (2017). Effect of Slope Angle on the Stability of a Slope under Rainfall Infiltration. *Indian Geotechnical Society 2019*. 49, 708-717.

-Che Ghani A., Mohd T., Hasbollah D. (2020). Effect of rainfall pattern on slope stability



stability in unsaturated soils. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 31, 105-113.

-Rahardjo H., Satyanaga A., Leong E. (2016). Effects of rainfall characteristics on the stability of tropical residual soil slope. *E3S Web of Conferences*. 9, 6.

-Rahardjo H., Satyanaga N., Leong Ch. and Ng Y. (2010). Effects of Groundwater Table Position and Soil Properties on Stability of Slope during Rainfall-J. Geotech. *Geoenviron. Eng.* 2010.136, 1555-1564.

-The Viet T., Thu T., Lee G., Oh S., Van N. (2015). Effect of Extreme Rainfall on Cut Slope Stability, Case Study in Yen Bai City, Viet Nam, *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*. 16(4), Vol. 9, 23-32.

-Ebrahimi Majid, Habibolahian Mahmoud, Amir-Ahmadi Abolghasem, Zangeneh Asadi Mohammad Ali and Nezhadssoleimani Hamid (2015), Considering the road building effect on the occurrence of surface landslides by using the slope stability model (Case Study: Kalat Basin), *Geographical Planning of Space Quarterly Journal*, 5(15), 149-162 (In Persian).

-Hossain. J., Hossain. MS., Hoyos. L.R. (2013). Effect of Rainfall on Stability of Unsaturated Earth Slopes Constructed on Expansive Clay. *Geo Congress*, 417-425.

-Kristo Ch., Rahardjo H., Satyanaga A. (2017). Effect of variations in rainfall intensity on slope stability in Singapore. *International Soil and Water Conservation Research*. 5, 258-264.

-Ng. C. w. w., Shi Q. (1997). Influence of rainfall intensity and duration on slope

# Combined Effect of Rainfall and Road on the Stability of Soil Slopes

*Ali Rezaei, Geotechnical MSc Student, Department of Civil Engineering,  
Faculty of Engineering, Yasouj University, Yasouj, Iran.*

*Masoud Rabeti Moghadam, Assistant Professor, Department of Civil Engineering,  
Faculty of Engineering, Yasouj University, Yasouj, Iran.*

*Mahdi Zamani Lenjani, Assistant Professor, Department of Civil Engineering,  
Faculty of Engineering, Yasouj University, Yasouj, Iran.*

*Hossein Montaseri, Assistant Professor, Department of Civil Engineering,  
Faculty of Engineering, Yasouj University, Yasouj, Iran.*

*E-mail: rabeti@yu.ac.ir*

Received: June 2023- Accepted: February 2024

## **ABSTRACT**

Slopes are one of the main parts of the environment, which are the habitat of many organisms. Annually, some slopes become unstable due to rainfall, in addition to road rainfall; it can decrease or increase the safety factor of the slope. Stabilizing soil slopes against rainfall is one of the basic challenges discussed in the design and implementation of road construction projects. A parametric study has been used to investigate the combined effect of rainfall and road on the stability of soil slopes using SEEP/W and SLOPE/W software. In this study, first, the effect of rainfall with different intensities on the slope without road was performed. According to the results, depending on the location of the road in the slope, the construction of the road can lead to a decrease or an increase in the initial safety factor in the slope. With the increase in intensity and time of rainfall, the seepage front, water pressure and underground water level increase and the safety factor is decreased. By examining the combined effect of rainfall and road in a case study, it was concluded that the construction of the road on the slope will reduce safety factor more severely during rainfall compared to the case without road. Finding of the present study shows the need to consider the combined effect of road and rainfall during slope stability analysis, which can lead to the reduction of landslides adjacent to the roads.

**Keywords:** Rainfall, Road, Soil Slope, Slope Stability, Safety Factor