

## مدل برآورد آستانه شروع رواناب با استفاده از شبیه‌ساز باران در کرت‌های صحرائی

نادرقلی ابراهیمی<sup>۱\*</sup>، علیرضا اسلامی<sup>۲</sup> و فرود شریفی<sup>۳</sup>  
<sup>۱</sup> استادیار، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری،<sup>۲</sup> دانشیار، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۱۲/۰۶

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۷/۲۷

### چکیده

در شرایط اقلیمی خشک و نیمه‌خشک کشور، فقر پوشش گیاهی و کوهستانی بودن حوزه‌های آبخیز، با تمرکز و تبدیل رواناب به سیلاب، سالانه خسارات جانی و مالی فراوانی به مراکز صنعتی، شهری و روستایی وارد می‌شود. در طراحی و ایمن‌سازی پروژه‌های عمرانی، برآورد آستانه شروع رواناب یکی از مهم‌ترین عوامل موثر در دقت برآورد حجم و شدت سیل محسوب شده و محاسبه دقیق آن می‌تواند منجر به صرفه‌جویی در هزینه اجرایی و بهینه‌کردن ابعاد سازه‌های فنی شود. در این پژوهش، برای بررسی عوامل مؤثر در تعیین آستانه شروع رواناب از داده‌های باران‌ساز و شبیه‌سازی رایانه‌ای استفاده شد. با استفاده از دستگاه باران‌ساز، باران در شدت‌های هشت تا ۴۰ میلی‌متر در ساعت و مدت‌های ۱۵، ۳۰، ۶۰ و ۱۲۰ دقیقه شبیه‌سازی و آستانه شروع رواناب در هر آزمایش اندازه‌گیری شد. با استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده و به‌کارگیری روش‌های رگرسیونی چند متغیره خطی و غیرخطی، مدل‌های مناسبی برای برآورد آستانه شروع رواناب بر اساس عوامل و ویژگی‌های بارش، خاکشناسی و زمین به‌دست آمد. نتایج نشان داد که عمق و شدت بارندگی به‌عنوان عوامل اقلیمی، پوشش گیاهی و شیب به‌عنوان عوامل زمین و نوع بافت شنی و رسی نیز به‌عنوان عوامل خاکشناسی، متغیرهایی موثر در تعیین آستانه شروع رواناب هستند. ارتباط عوامل مستقل یاد شده و مشارکت آن‌ها به‌نحوی است که تخمین‌گر معنی‌دار برای آستانه شروع رواناب در منطقه می‌باشند. نتایج این پژوهش بیانگر ارتباط معنی‌داری بین مقادیر مشاهداتی و برآوردی آستانه شروع رواناب است، به‌نحوی که روابط رگرسیونی بین این مقادیر ضریب تبیینی معادل ۰/۹۸ را نشان داد.

**واژه‌های کلیدی:** بارش رواناب، بارش مازاد، بارش مصنوعی، ظرفیت ذخیره سطحی، ظرفیت نفوذ

### مقدمه

کمتر خواهد بود. تمرکز و تبدیل بارش به سیلاب، سالانه خسارات جانی و مالی فراوانی به مراکز صنعتی، شهری و روستایی وارد می‌کند. وقوع سیلاب سبب شستشو و انتقال خاک‌های حاصلخیز سطحی و فرسایش خاک می‌شود. ورود خاک‌های فرسایش یافته همراه با جریان طغیانی رودخانه‌ها در مخازن سدها،

آستانه شروع رواناب، بیانگر مقداری از بارندگی است که پس از آن رواناب آغاز می‌شود. وقتی شدت بارش از ظرفیت نفوذ خاک بیشتر باشد، بارش مازاد به رواناب تبدیل می‌شود. از سوی دیگر، هر چه شدت نفوذ آب در خاک بیشتر باشد، مقدار رواناب تولید شده

بر پایه باران نیز از این وسیله بهره‌گیری می‌شود. Kavian و همکاران (۲۰۱۰)، با هدف بررسی متغیرهای موثر خاک بر فرایند رواناب و فرسایش خاک و با ایجاد باران مصنوعی به وسیله دستگاه باران-ساز در دو پایگاه جنگلی در ساری و نمونه‌برداری از عمق صفر تا ۲۰ سانتی‌متری خاک به این نتیجه رسیدند که متغیرهای رطوبت پیشین خاک، ماده آلی، وزن مخصوص ظاهری و درصد ذرات شن به ترتیب بیشترین تاثیر را در تولید رواناب دارند. همچنین، در فرایند فرسایش خاک به ترتیب متغیرهای درصد مواد آلی، رطوبت پیشین خاک و سیلت بیشترین تاثیر را در اراضی جنگلی داشته‌اند. از طرف دیگر، نتایج مدل چند متغیره خطی نشان داد که با بهره‌گیری از سه متغیر درصد ماده آلی، رطوبت پیشین خاک و رس می‌توان میزان رواناب و فرسایش خاک را به ترتیب با ضریب تبیین ۰/۶۳۸ و ۰/۷۰۱ برآورد نمود.

Defersha و Mellese (۲۰۱۲)، در پروژه تحقیقاتی خود در اتیوپی با انجام کار آزمایشگاهی ارزیابی اثر شدت بارندگی، شیب، انواع خاک و رطوبت قبلی بر غلظت رسوب را بررسی نمودند. آزمایش‌ها با استفاده از دستگاه باران‌ساز انجام و از شدت‌های بارندگی ۱۲۰، ۷۰ و ۵۵ میلی‌متر در ساعت استفاده شد. سه شیب نه، ۲۵ و ۴۵ درصد و برای سه نوع خاک در حوضه الامایا اتیوپی خاک‌های الف، ب و ج که به ترتیب از بافت رسی به خاک لوم شنی و رسی تغییر نمود، با شرایط تر و خشک و با وجود رطوبت قبلی استفاده شد. نتایج نشان داد، میزان غلظت رسوب تولیدی به طور قابل توجهی با رطوبت قبلی وابسته است. رطوبت خاک به ترتیب غلظت رسوب خاک الف، ب و ج را ۲۳، ۴۵/۷ و ۱/۳ درصد کاهش داد. میزان رطوبت اولیه، شیب و شدت بارندگی بر رسوب تولیدی موثر است و مرطوب بودن خاک اثر کاهشی بر رسوب تولیدی دارد.

Arnaez و همکاران (۲۰۰۷)، عوامل موثر بر رواناب و فرسایش را با ایجاد باران مصنوعی در شیب‌های ملایم باغ‌های انگور مدیترانه مورد مطالعه قرار دادند. ۲۲ بارش با شدت ۳۰ تا ۱۱۷/۵ میلی‌متر بر ساعت با دوره بازگشت دو تا ۱۲۷ سال، بافت لومی با پوشش شن سطحی و غیر همگن اعمال و مقادیر

سبب رسوب‌گذاری و پر شدن مخازن می‌شود. به دلیل کمبود یا فقدان داده‌های اندازه‌گیری مستقیم رواناب، برای برآورد میزان و شدت سیل، از داده‌های بارش و شدت رگبارها استفاده می‌شود. در ابتدای تبدیل بارش به رواناب، مقداری از بارش به وسیله خاک جذب شده، یا به اعماق زمین نفوذ می‌کند و باقی‌مانده تبدیل به رواناب سطحی می‌شود. پس از تعیین آستانه شروع رواناب در هر منطقه با استفاده از روش‌های بیولوژیک و عملیات مهندسی می‌توان تمهیدات مناسب را به کار گرفت و با برآورد صحیح و عملیات مدیریتی و مهندسی از تبدیل رواناب به سیلاب جلوگیری کرد. این امر سبب کاهش حجم سیلاب‌ها، کاهش هزینه خسارات سیل و فرسایش، کنترل فرسایش تشدید شونده و استفاده بیشتر از نزولات می‌شود.

روابط بارش رواناب از موضوعات مهم در علم هیدرولوژی و منابع آب بوده و به همین دلیل مورد توجه محققین مختلف قرار گرفته است. Tabatabaee و همکاران (۲۰۰۹)، الگوهای رگرسیونی رواناب حاصل از سطوح آبگیر کوچک (پشت بام) را در مشهد بر مبنای بارش‌های مشاهده‌ای از طریق مدل‌های رگرسیونی بررسی کردند. به این منظور، در استخراج روابط رگرسیونی مناسب، مدل‌های خطی و لگاریتمی مورد ارزیابی قرار گرفتند. الگوهای برآوردی رواناب در پژوهش یاد شده مبتنی بر وقایع بارش بود. به طور کلی، کاربرد روش‌های آماری تجزیه و تحلیل عاملی در تعیین عوامل مؤثر و نیز روابط رگرسیونی در تعیین مدل‌های برآوردی رواناب تا کنون مورد توجه کارشناسان و پژوهشگران زیادی بوده است. از جمله آنان می‌توان به Eslami و Saghafian (۲۰۰۸)، Bloomfield و همکاران (۲۰۰۹)، Eslami و Kazemi (۲۰۱۳) اشاره نمود.

به نظر Seeger (۲۰۰۷)، باران‌سازها امکان اندازه‌گیری‌های متعدد را در اراضی مختلف به منظور تعیین عوامل مؤثر بر رواناب و فرسایش فراهم می‌نمایند که از داده‌های آن برای اهداف مختلف می‌توان استفاده نمود. با وجود چالش‌های موجود، استفاده از باران‌سازها به دلیل برتری‌های متعدد در پژوهش‌های هدررفت خاک و تولید رسوب در جهان رایج می‌باشد. از طرفی، برای درجه‌بندی و اعتبارسنجی مدل‌های فرسایشی فیزیکی

گیری شد. با بررسی نتایج حاصل از انجام آزمایش‌ها، مشخص شد که متغیرهای مؤثر در تعیین آستانه شروع رواناب به ترتیب اهمیت، عمق باران، شدت باران، درصد پوشش، درصد شن، درصد رس و درصد شیب است. سپس، یک رابطه تجربی برای محاسبه آستانه شروع رواناب با استفاده از عمق، شدت باران و خصوصیات فیزیوگرافی شامل درصد رس، درصد شن، درصد پوشش و درصد شیب به دست آمد. آستانه شروع رواناب به دست آمده از این رابطه با آستانه شروع رواناب واقعی ۹۸ درصد همبستگی دارد. اختلاف تولید رواناب در دو وضعیت رطوبتی خشک و مرطوب بسیار زیاد بوده و در خاک‌های مرطوب بلافاصله پس از دقایق اولیه بارندگی، میزان رواناب به نزدیک نقطه اوج خود در طول بارش شبیه‌سازی شده می‌رسد. نتایج نشان داد که مقدار رواناب به میزان رطوبت اولیه بستگی دارد و هر چه رطوبت اولیه خاک بیشتر باشد، سرعت نفوذ کاهش یافته و میزان رواناب بیشتر می‌شود.

Raeesiyan (۲۰۰۵)، در یک بررسی صحرایی با استفاده از یک دستگاه شبیه‌ساز باران قابل حمل، زمان شروع رواناب در خاک‌هایی با کاربری زراعی و مرتعی و در شرایط رطوبتی و شیب‌های مختلف اندازه‌گیری نمود. نتایج به دست آمده حاکی از این است که با افزایش شیب، زمان شروع رواناب به صورت یکنواخت کاهش می‌یابد. در اراضی با کاربری مرتع بر خلاف نتیجه آزمایش‌های انجام شده در اراضی زراعی در هر دو شرایط خشک و مرطوب، با افزایش شیب از ۲۵ به ۳۵ درصد زمان شروع رواناب نیز افزایش یافته است.

Martinez و همکاران (۱۹۹۸)، در مناطق نیمه-خشک مدیترانه‌ای اسپانیا مکانیسم تولید رواناب را در حوضه‌های کوچک بررسی کرده و عوامل مؤثر در تولید رواناب را معرفی کردند. در این بررسی، از دو گروه خاک با عکس‌العمل‌های هیدرولوژیکی متفاوت استفاده شد. نتایج این بررسی نشان داد که خاک‌های ریزافت با نفوذپذیری و مواد آلی کم، ضریب رواناب بالاتر و آستانه شروع رواناب کمتری از خاک‌های درشت بافت با نفوذپذیری بیشتر و مواد آلی متوسط دارند. اثر خصوصیات بارش در عکس‌العمل هیدرولوژیکی خاک

رواناب سطحی ۷/۲ تا ۱۰۴ میلی‌متر بر ساعت را برداشت نمودند. آن‌ها تاثیر شدت بارش و میزان رواناب را با ضریب تبیینی در حد ۳۶ درصد ارائه و نتیجه گرفتند که علاوه بر شدت بارندگی، انرژی جنبشی رگبار، مقاومت ذرات خاک در مقابل برخورد قطرات باران، میزان پوشش گیاهی و شیب بر میزان رواناب و آستانه آن تاثیرگذار می‌باشد.

Castillo و همکاران (۲۰۰۳)، با بررسی نقش رطوبت پیشین خاک و پاسخ حوزه آبخیز در ایجاد رواناب در حوضه‌های نیمه‌خشک جنوب اسپانیا نتیجه‌گیری کردند که پاسخ خاک برای بارش‌های با شدت‌های بالا مستقل از رطوبت پیشین خاک می‌باشد و برای رگبارهای با شدت متوسط و پایین که دارای فراوانی نسبی در مناطق نیمه‌خشک هستند، رطوبت پیشین خاک نقش مهمی در کنترل رواناب دارد. در شرایط بارش با شدت بالا و خاک‌های کم نفوذ جریان رو قشری مازاد بر نفوذ، غالب است و به رطوبت پیشین خاک وابسته نیست. در حالی که در رگبارهای با شدت متوسط و پایین و خاک‌های با نفوذ بیشتر رواناب غالباً به رطوبت پیشین خاک و در حضور پوشش گیاهی وابسته است.

Hawke و همکاران (۲۰۰۶)، طی یک کار آزمایشگاهی تاثیر رطوبت پیشین خاک و شدت بارش را بر روی هدایت هیدرولیکی قشر سطحی بررسی نمودند. ایشان یک منحنی نمایی که تابعی از پتانسیل آب و آب موجود در خاک بود را با استفاده از معادلات ریچارد برای تعیین هدایت هیدرولیکی و با یک برازش مناسب ارائه دادند. نتایج نشان داد که با افزایش شدت بارش پراکنش نقاط در اطراف خط برازش داده شده بیشتر می‌شود که احتمالاً به شکسته شدن ساختمان سطحی خاک مربوط می‌باشد و در بازه‌های زمانی کوتاه نیز مدل ترکیبی ریچارد قابل بهره‌برداری نبوده و امکان استفاده از نتایج آزمایشگاهی به عرصه فراهم نمی‌باشد.

Sharifi و همکاران (۲۰۰۴)، برای تعیین آستانه شروع رواناب در حوزه آبخیز لتیان از یک شبیه‌ساز باران قابل حمل استفاده نمودند. با ایجاد بارش در شدت و مدت‌های مختلف در کرت‌های مطالعاتی، آستانه شروع و میزان رواناب در هر آزمایش اندازه-

علفزار و بوته‌زار و با استفاده از شبیه‌ساز باران مورد مقایسه قرار دادند. برای تعیین واحدهای کاری پوشش گیاهی منطقه به دو تیپ گیاهی و هر تیپ به چهار جهت اصلی و دو طبقه شیب (۲۰-۱۲ درصد و ۴۰-۲۰ درصد) تقسیم‌بندی شد. اندازه‌گیری رواناب و رسوب در هر واحد کاری و با سه تکرار انجام شد. نقاط اندازه‌گیری به صورت تصادفی مشخص و شدت بارندگی ۱/۶ میلی‌متر بر دقیقه و تداوم ۱۰ دقیقه برای تولید رواناب و رسوب به کار گرفته شد. نمونه‌های خاک از عمق ۰-۴۰ سانتی‌متر جمع‌آوری و عوامل اسیدیته، مواد آلی، هدایت الکتریکی، فسفر، پتاسیم، کلسیم، منیزیم و بافت در آزمایشگاه اندازه‌گیری شدند. نتایج آزمون دانکن و رگرسیون چند متغیره نشان داد که تیپ گیاهی علفزار رواناب و رسوب بیشتری نسبت به بوته‌زار تولید می‌کند، اما زمان شروع رواناب در علفزار کمتر از بوته‌زار است. همچنین، جهت جغرافیایی، شیب و عوامل هدایت الکتریکی، کلسیم، رس و فسفر تاثیر معنی‌داری بر رواناب، رسوب و زمان شروع رواناب دارند. این عوامل دارای یک رابطه خطی با رواناب و رسوب می‌باشند. در این پژوهش، با توجه به ابهامات و تأثیرات عوامل محلی بر آستانه شروع و ضریب رواناب، هدف اصلی، میزان تأثیر عوامل پوشش، شیب عرصه، نوع بافت خاک و شدت و عمق بارش در تعیین حد آستانه شروع رواناب است.

### مواد و روش‌ها

**منطقه مورد پژوهش:** آزمایش‌های مدنظر پژوهش در استان تهران، حوضه لواسان انجام شد. ابتدا، با تحلیل بارندگی منطقه، شدت بارش‌های ۱۵ تا ۱۲۰ دقیقه با دوره برگشت‌های ۱۵ تا ۲۰ ساله تعیین شدند. سپس، در شدت و مدت‌های مختلف (مدت‌های ۱۵، ۳۰، ۶۰ و ۱۲۰ دقیقه و شدت‌های هشت تا ۴۰ میلی‌متر در ساعت) که بر اساس سوابق بارش‌های ۲۰-۱۵ ساله منطقه به دست آمده بود، در ۲۰ کرت آزمایشی در خاک‌ها، پوشش‌ها و شیب‌های مختلف شبیه‌سازی باران محل انجام و رواناب تولیدی هر کرت اندازه‌گیری شد. تعداد ۲۰ کرت طبیعی و دست نخورده به طور تصادفی انتخاب و مورد مطالعه قرار گرفتند. شیب

متفاوت گزارش شده است. شدت بارش عامل عمده کنترل کننده رواناب در حوضه‌های با بافت ریز، نفوذپذیری کم و پوشش گیاهی تنک بود، در حالی که در خاک‌های درشت بافت‌تر، نفوذپذیر و با پوشش گیاهی متراکم‌تر مجموع بارش با رواناب ارتباط بیشتری نشان می‌دهد.

Porhema و همکاران (۲۰۱۴)، بررسی رابطه رواناب و شدت بارش را در اراضی مرتعی حوزه آبخیز فاقد ایستگاه هیدرومتری سنگانه کلات خراسان مطالعه نمودند. ایشان با ارائه منحنی‌های رابطه حجم رواناب و مساحت حوضه و بررسی ضریب رواناب در شدت‌های مختلف، به این نتیجه رسیدند که شدت بارش از عوامل مهم ایجاد رواناب بوده و با افزایش شدت بارندگی حجم رواناب تولیدی افزایش می‌یابد.

نتایج پژوهش Khaledi Darvishan و همکاران (۲۰۱۵)، نشان داد که رواناب با سپری شدن مدت زمانی پس از شروع بارندگی شکل گرفته و تا حد زیادی وابسته به ویژگی‌های بارندگی، خاک و شیب است. شدت بیشتر باران و کاهش ظرفیت آب‌گیری لایه‌های سطحی خاک موجب افزایش حجم رواناب شده و در ادامه نیروی بیشتری برای کنش و انتقال ذرات خاک آماده می‌شود. اولویت‌بندی عامل‌های مؤثر بر زمان شروع و ضریب رواناب تا حد زیادی به مقیاس مورد بررسی وابسته است. از سوی دیگر، آگاهی از زمان شروع و ضریب رواناب و شناخت عامل‌های مؤثر بر آن نیز برای ارائه راه‌کار مدیریتی منجر به ایجاد تأخیر در وقوع و کاهش مقدار رواناب ضروری است. اهمیت رطوبت پیشین خاک تا حدی است که در بارندگی‌های با دوره بازگشت‌های کمتر از ۱۵ سال می‌تواند رواناب را به صورت معنی‌داری تحت تأثیر قرار دهد. اگرچه افزایش شدت بارندگی در بیشتر خاک‌ها با کاهش نفوذ، باعث افزایش رواناب می‌شود، اما گاهی می‌تواند با افزایش نفوذ به دلیل عدم تجانس مکانی ویژگی‌های نفوذ لایه سطحی خاک، موجب کاهش رواناب شود. صرف نظر از موارد مطرح شده، امکان اثر متقابل شدت بارندگی و رطوبت پیشین خاک بر نفوذ و رواناب نیز بر اهمیت بررسی آن‌ها می‌افزاید.

Aghabeigi Amin و همکاران (۲۰۱۴)، در مطالعه‌ای تولید رواناب و رسوب را در دو تیپ گیاهی

Anti-image و آماره  $\chi^2$  MSA مورد استفاده قرار گرفت. هر چند تجزیه عاملی به منظور کاهش داده و انتخاب مهم‌ترین عوامل از بین چندین عامل به کار برده می‌شود، اما، در این پژوهش با توجه به تعداد عامل‌های نسبتاً محدود (شش عامل)، فرایند تجزیه عاملی به منظور تعیین عوامل مستقل و با اهمیت‌تر در مقایسه با سایر عوامل دنبال شده است.

**تعیین عوامل موثر بر آستانه شروع رواناب:** برای بررسی ارتباط و میزان تأثیر هر یک از متغیرهای عمق بارش، شدت بارش، عمق رواناب، درصد رس، درصد شن، درصد پوشش گیاهی و درصد شیب به‌عنوان متغیرهای مستقل بر آستانه شروع رواناب از روابط رگرسیونی چند متغیره خطی و غیرخطی استفاده شد. جدول ۱، برخی معیارهای آماری عوامل اندازه‌گیری شده را برای ۵۱ نمونه نشان می‌دهد.

**مدل برآورد آستانه شروع رواناب:** در این پژوهش، استخراج روابط بین عامل وابسته یعنی آستانه شروع رواناب ( $T_R$ ) با عوامل مستقل که شامل عوامل اقلیمی، زمینی و خاکشناسی است، از طریق بررسی مدل‌های رگرسیونی انجام شد. رابطه کلی رگرسیون مورد استفاده در این پژوهش به شرح زیر است.

$$T_R = aCl + bLa + cSo + d \quad (1)$$

که در آن،  $Cl$  عامل اقلیمی،  $La$  عامل زمینی و  $So$  عامل خاکشناسی و عوامل  $a$ ،  $b$  و  $c$  ضرایب و  $d$  نیز ثابت عددی رابطه است.

همچنین، میزان دقت مدل‌ها و نیز خطای برآوردی آن‌ها بر اساس معیارهای ضریب تعیین و خطای استاندارد بررسی شد. ضمن آن‌که دقت و کارایی مدل پرکاربرد خطی با استفاده از آزمون رگرسیونی مقادیر استاندارد باقی‌مانده و نمودار پراکنش احتمال جمع‌ی مقادیر برآوردی نسبت به مشاهداتی نیز مورد ارزیابی قرار گرفت. در نتیجه به لحاظ آماری با توجه به سطوح معنی‌داری کمتر از یک درصد و پنج درصد، مدل‌های مناسب استخراج شد.

غالب در کرت‌ها اندازه‌گیری و بافت خاک هر کرت در آزمایشگاه تعیین شد. برای اندازه‌گیری پوشش گیاهی کرت‌ها، درصد پوشش کرت از طریق پلات در محلی که تقریباً معرف شرایط میانگین کرت باشد، در نظر گرفته شد. در این بررسی، ۵۱ بارش مصنوعی با استفاده از شبیه‌ساز باران ایجاد و پس از ایجاد بارش‌ها در شدت و مدت معین رواناب ایجاد شده از هر کرت در انتهای هر آزمایش اندازه‌گیری شد. آزمایش‌ها برای دو سال آبی انجام و رواناب تولیدی هر کرت اندازه‌گیری شد.

**روش پژوهش:** در آزمایش‌های این پژوهش، از یک شبیه‌ساز باران از نوع فشاری به ابعاد پوشش سطح چهار متر مربع ( $2 \times 2$  متر)، ارتفاع نزول باران ۳-۱/۵ متر (ارتفاع دستگاه قابل تغییر است)، قدرت پمپاژ ژنراتور ۲/۵ اسب بخار، قطر لوله انتقال آب از رودخانه دو اینچ، طول لوله انتقال آب از رودخانه به‌وسیله موتور پمپ و لوله ۲۰ متر، ارتفاع مکش پمپ سه متر و دبی موتور پمپ پنج لیتر در ثانیه، استفاده شد (Tahmasebi, 2002).

**بررسی عوامل تأثیرگذار بر آستانه شروع رواناب:** در این پژوهش، روش تجزیه و تحلیل عاملی به روش (PCA)<sup>۱</sup> با استفاده از نرم‌افزار SPSS با دخالت سه نوع عامل متفاوت اقلیمی، زمینی و خاکشناسی به‌منظور شناخت میزان تأثیر و درجه اهمیت آن‌ها در تعیین آستانه شروع رواناب در منطقه مورد پژوهش به‌کار گرفته شد. متغیرهای مورد استفاده از جنبه اقلیمی عامل عمق بارش، از جنبه زمینی شیب و پوشش گیاهی و از نظر خاکشناسی نیز بافت خاک در دو نوع رسی و شنی، اندازه‌گیری شد.

به‌منظور کمینه کردن واریانس بارهای هر یک از عوامل و تسهیل در تفسیر ساختار عاملی و ایجاد استقلال در عامل‌ها، محورهای عاملی با روش واریماکس<sup>۲</sup> دوران یافت. سپس، با استفاده از روش مدل رگرسیونی، ماتریس امتیازات عاملی استخراج شد. برای بررسی متغیرهای کم اهمیت و غیر ضروری و با توجه به همبستگی جزئی، ماتریس همبستگی

<sup>1</sup> Principal Component Analysis

<sup>2</sup> Varimax Rotation

<sup>3</sup> Measure of Sampling Adequacy

جدول ۱- عمق و شدت بارش، عمق رواناب، درصد رس، شن، پوشش گیاهی و شیب در نمونه‌های اندازه‌گیری شده

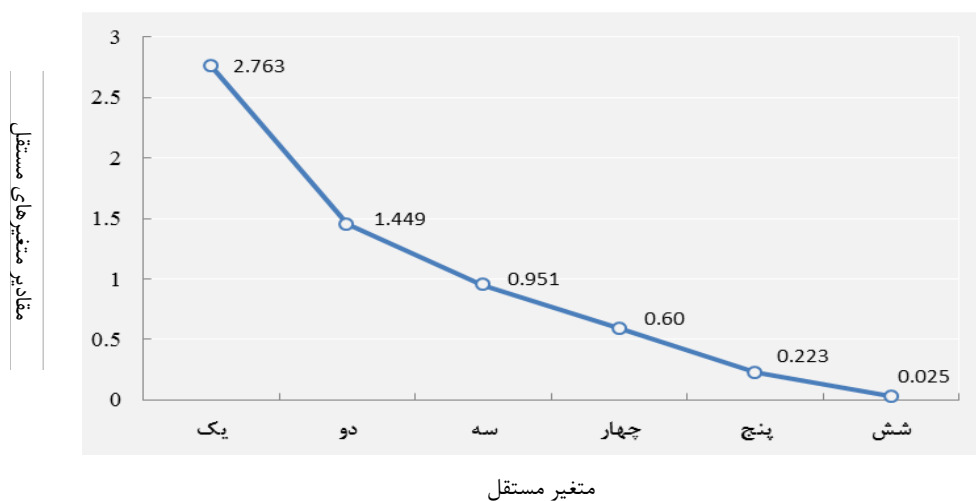
نوع عامل	واحد	تعداد نمونه	کمترین	بیشترین	متوسط
عامل وابسته $T_R^*$	میلی‌متر	۵۱	۵	۵۸/۵	۲۳/۵
عوامل غیروابسته					
I	میلی‌متر بر ساعت	۵۱	۸	۴۰	۲۳/۹
P	میلی‌متر	۵۱	۵/۵	۶۴/۵	۲۷/۱
C	درصد	۵۱	۵	۴۶	۳۴/۵
S	درصد	۵۱	۱۴	۹۰	۳۴/۹
V	درصد	۵۱	۱۰	۹۰	۴۲/۹
SI	درصد	۵۱	۵	۷۰	۲۷/۸

\*  $T_R$  آستانه شروع رواناب،  $P$  عمق بارش،  $C$  درصد رس،  $S$  درصد شن،  $V$  درصد پوشش گیاهی و  $SI$  درصد شیب

### نتایج و بحث

متغیرهای اصلی، نقش اساسی خود را در مقایسه با شش عامل دیگر نشان می‌دهند. نمودار مقادیر ویژه اولیه هر یک از متغیرها در شکل ۱ آمده است.

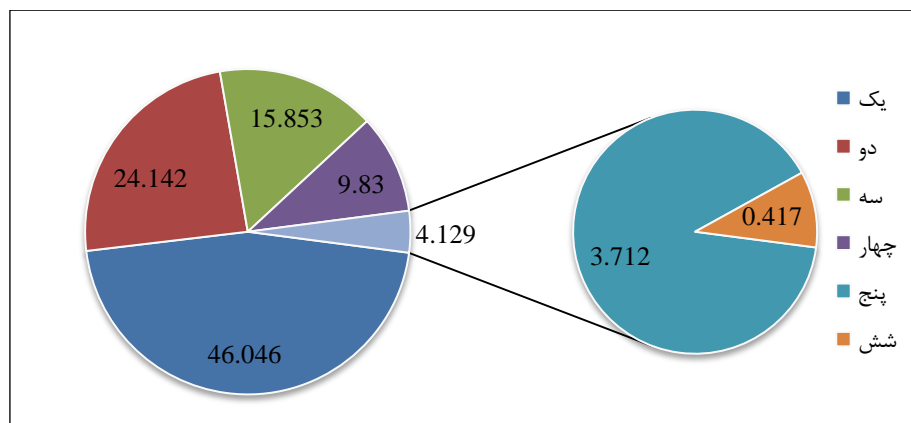
نتایج تحلیل عاملی در تعیین عوامل مستقل مؤثر نشان داد که با توجه مقادیر ویژه اولیه (Eigen values) هر یک از متغیرها، چهار عامل به‌عنوان



شکل ۱- نمودار هندسی مقادیر ویژه هر یک از متغیرها

این راستا، از جنبه میزان توضیح واریانس داده‌ای، نتایج بیانگر تبیین ۹۵/۸۷۱ درصد واریانس داده‌ها با استفاده از چهار عامل مورد آزمون با بیشترین مقادیر ویژه اولیه است. بنابراین، دو عامل از شش عامل مورد آزمون تاثیر چندانی در برآورد عامل وابسته (آستانه شروع رواناب) با وجود دخالت چهار عامل دیگر ندارند. تاثیر عوامل به گونه‌ای است که درصد تجمعی واریانس تبیین شده مربوط به دو عامل دیگر کمتر از پنج درصد است (شکل ۲).

با توجه به نمودار شکل ۱، متغیر یک (عامل خاکشناسی) بیشترین مقدار ویژه (۲/۷۶۳) و پس از آن متغیر دوم (عوامل زمینی مثل پوشش گیاهی و شیب عرصه) با مقدار ویژه ۱/۴۴۹ با اهمیت‌ترین و موثرترین عامل مستقل محسوب می‌شوند. روند تاثیرگذاری مطابق شکل ۱، به‌ترتیب برای سایر مولفه‌ها دارای ترتیب نزولی است. شکل ۲، جزئیات مربوط به درصد کل واریانس تبیین شده به ازای هر یک از متغیرهای شش‌گانه مورد آزمون را نشان می‌دهد. در



شکل ۲- درصد کل واریانس تبیین شده به ازای هر یک از متغیرهای شش گانه

(آستانه شروع رواناب) از طریق استفاده از یک نوع بافت خاک (درصد رس و یا درصد شن) در قالب متغیر اول کفایت می‌کند. همین استنباط برای عامل زمینی با دو دخالت یکی از دو عامل پوشش گیاهی و یا شیب عرصه نیز قابل توجیه است. از سوی دیگر، دو عامل عمق و شدت بارش هر چند یک نوع عامل اقلیمی بوده، اما نقش متمایزی را نشان می‌دهند.

روش تجزیه به متغیرهای اصلی (PCA) با توجه به ماتریس چرخشی متغیرها، نشان‌دهنده آن است که عامل خاکشناسی (نوع بافت رسی و شنی خاک) در قالب متغیر اول و عوامل زمینی (پوشش گیاهی و شیب عرصه) به‌عنوان متغیر دوم، عوامل اقلیمی عمق و شدت بارش نیز به‌ترتیب به‌عنوان دیگر متغیرهای مستقل است (جدول ۲). طبق نتایج جدول ۲، تاثیرگذاری عامل خاکشناسی در برآورد عامل وابسته

جدول ۲- ماتریس چرخشی متغیرهای عاملی بر اساس روش PCA

متغیرها				عوامل مورد آزمون
چهار	سه	دو	یک	
۰/۹	۰/۳۴۶	-۰/۰۴۹	-۰/۱۲۱	شدت بارش
۰/۳۱۹	۰/۹۲۳	-۰/۰۳۲	-۰/۰۴۶	عمق بارش
-۰/۱۲۹	-۰/۰۰۳	۰/۲۴۴	۰/۹۵۳	بافت رسی خاک
۰/۰۲۶	۰/۰۸۴	-۰/۱۶۷	-۰/۹۷۶	بافت شنی خاک
۰/۲۷۴	-۰/۳۰۷	۰/۸۱۳	۰/۳۱۲	پوشش گیاهی
۰/۲۵۹	۰/۱۴۳	۰/۹۱۱	۰/۱۷۴	شیب عرصه

روابط مختلف خطی، توانی و نمایی مربوط به عامل عمق بارش را نسبت به پراکنش نقاط مشاهداتی آستانه شروع رواناب نشان می‌دهد.

**ب- روابط خطی چند متغیره:** مدل‌های رگرسیونی دو، سه و چند متغیره خطی در جدول ۴، ارائه شده است. همگی این روابط به لحاظ آماری در سطح معنی دار کمتر از یک درصد از دقت قابل قبول برخوردار هستند، ضمن آن‌که دو مشخصه آماری روابط استخراجی شامل خطای استاندارد و ضریب تبیین نیز در جدول ۴، نشان داده شده است. همان‌طور که

### روابط آستانه شروع رواناب

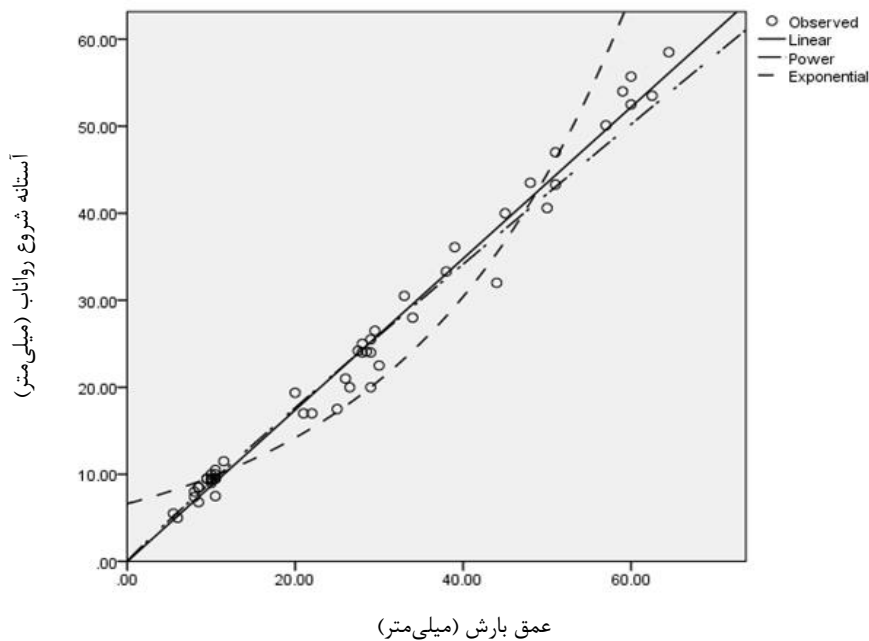
**الف- روابط تک متغیره خطی و غیرخطی:** نتایج بررسی مدل‌های تک متغیره برآورد آستانه شروع رواناب نشان داد که از میان عوامل انتخابی، عامل عمق بارش بهترین همبستگی را با عامل وابسته دارد. در این خصوص مناسب‌ترین روابط در فرم‌های خطی، توانی و نمایی در جدول ۳، ارائه شده است. مشخصه-های آماری روابط یاد شده، شامل سطح معنی‌داری و ضریب تبیین نیز به تفکیک روابط در جدول نشان داده شده است. علاوه بر آن، شکل ۳، نمودار هندسی

می‌نماید، از بین مدل‌های خطی با کمینه متغیر بهترین پیشنهاد می‌باشد. در اولویت دوم روابط (۵) و (۶) جدول ۴ با خطای استاندارد ۱/۸۵ و ضریب تبیین ۰/۹۸ و این‌که با متغیرهای پوشش گیاهی، عمق بارش، درصد رس و شیب آستانه رواناب را برآورد می‌نمایند، توصیه می‌شوند.

جدول ۴ نشان می‌دهد، ۱۰ رابطه خطی چند متغیره با عوامل مختلف ارائه شده است که همگی دارای ضریب تبیین بالا و خطای استاندارد پایین هستند. از طرفی در میان روابط ده‌گانه این جدول، رابطه ۸ با کمینه خطای استاندارد ۰/۸۴ و ضریب تبیین ۰/۹۸ که تنها با لحاظ دو متغیر عمق بارش و درصد پوشش گیاهی، امکان برآورد آستانه شروع رواناب را فراهم

جدول ۳- معادلات تک متغیره خطی و غیرخطی آستانه شروع رواناب

رابطه	ضریب تبیین ( $R^2$ )	درصد سطح معنی‌داری	نوع رابطه
$T_R = 0.870 \times P - 0.021$	۰/۹۸	۱	خطی
$P^{0.953} \times T_R = 1.019$	۰/۹۸	۱	توانی
$0.38P \cdot Exp \times T_R = 6.629$	۰/۹۸	۱	نمایی



شکل ۳- روابط خطی، توانی و نمایی عامل عمق بارش نسبت به آستانه شروع رواناب

مقادیر واقعی آستانه شروع رواناب نسبت به احتمال تجمعی مورد انتظار حول خط ۴۵ درجه بیانگر توانایی و کارایی قابل قبول مدل برآوردی است. در این راستا، نمودار هندسی پراکنش مقادیر محاسباتی نسبت به مقادیر مشاهده‌ای آستانه شروع رواناب نیز در شکل ۵ نشان داده شده است. وجود همبستگی بسیار بالای بین این دو سری داده با ضریب تبیین

### نتیجه‌گیری

دقت و کارایی مدل‌های برازش شده: به‌منظور بررسی و تحلیل دقت و کارایی مدل‌های برازش شده، نمودار احتمال تجمعی مقادیر واقعی آستانه شروع رواناب نسبت به احتمال تجمعی مورد انتظار به‌عنوان مثال برای رابطه (۴)، جدول ۴ ترسیم شد (شکل ۴). شکل ۴، نشان می‌دهد که پراکنش احتمال تجمعی



عامل به تنهایی نیز تخمین‌گر خوبی برای آستانه شروع رواناب محسوب می‌شود.

نتایج دیگر تحقیق نشان داد که عوامل پوشش گیاهی و شیب عرصه نیز به‌عنوان یک عامل زمینی مستقل نقش مهمی در تعیین آستانه شروع رواناب دارند، اما قابلیت برآورد عامل وابسته را با مشارکت عامل عمق بارش به‌طور توأمان دارند. هر چند دخالت یکی از این دو عامل زمینی کفایت لازم را دارد. مقایسه نتایج این تحقیق با مطالعات Sharifi و همکاران (۲۰۰۴)، که نشان دادند متغیرهای مؤثر در تعیین آستانه شروع رواناب به‌ترتیب اهمیت عمق باران، شدت باران، درصد پوشش، درصد شن، درصد رس و درصد شیب است، همخوانی دارد. همچنین، از نظر نوع بافت، شیب و رواناب ایجاد شده با مطالعات Defersha و Mellese (۲۰۱۲)، که در سه شیب نه، ۲۵ و ۴۵ درصد و با سه نوع خاک الف، ب و ج که بافت رسی تا خاک لوم شنی و رسی انجام شد، تناسب دارد. به‌طوری که میزان تولید رسوب و غلظت آن به‌طور قابل توجهی به رطوبت پیشین وابسته بوده و مرطوب بودن خاک اثر کاهشی بر رسوب تولیدی دارد.

۰/۹۸ بیانگر دقت مناسب و قابل قبول مدل‌های برازش شده است.

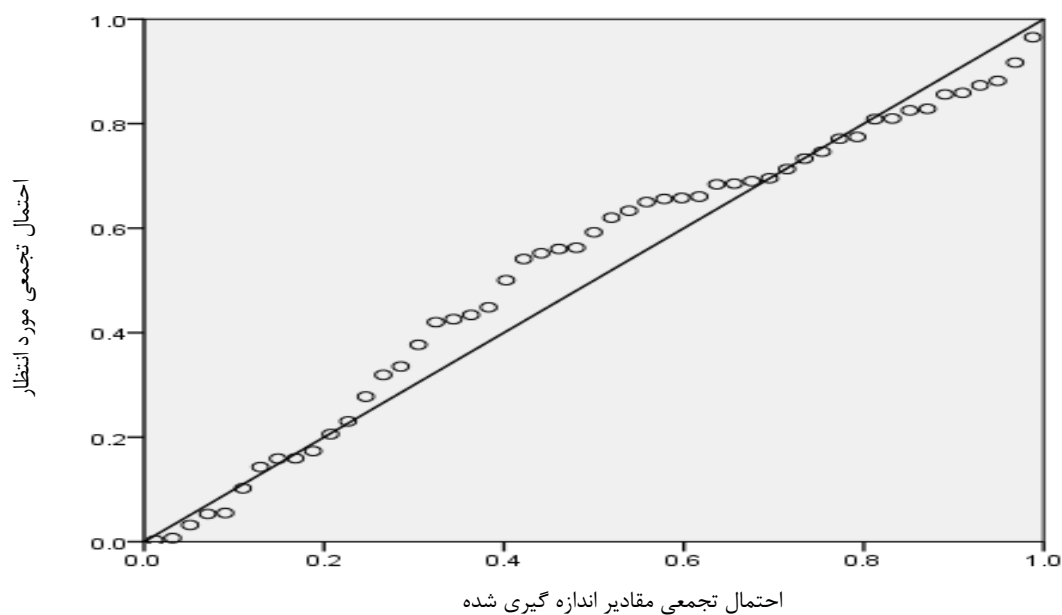
نتایج تحقیق نشان داد که رابطه دو متغیره آستانه رواناب با عمق بارش و درصد پوشش گیاهی بیشترین همبستگی و کمینه خطای استاندارد را نشان داده است. این رابطه با کمینه خطای استاندارد ۰/۸۴ و ضریب تبیین ۰/۹۸ که تنها با لحاظ دو متغیر عمق بارش و درصد پوشش گیاهی، امکان برآورد آستانه شروع رواناب را فراهم می‌نماید، از بین مدل‌های خطی با کمینه متغیر بهترین پیشنهاد می‌باشد.

بر اساس این تحقیق، نتایج تجزیه به عامل‌های اصلی (روش PCA)، نشان داد که عامل خاکشناسی با توجه به نوع آن یعنی بافت رسی و یا شنی (تاثیرگذاری مثبت و یا منفی)، عامل زمینی پوشش گیاهی و شیب عرصه و همچنین، عامل اقلیمی بارش از نظر عمق و شدت آن، نقش موثری در تعیین آستانه شروع رواناب منطقه دارند. از طرفی نتایج بررسی تعیین با اهمیت‌ترین عوامل در قالب استخراج مدل‌های رگرسیونی مناسب نشان داد که عامل عمق بارش از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به‌طوری که این

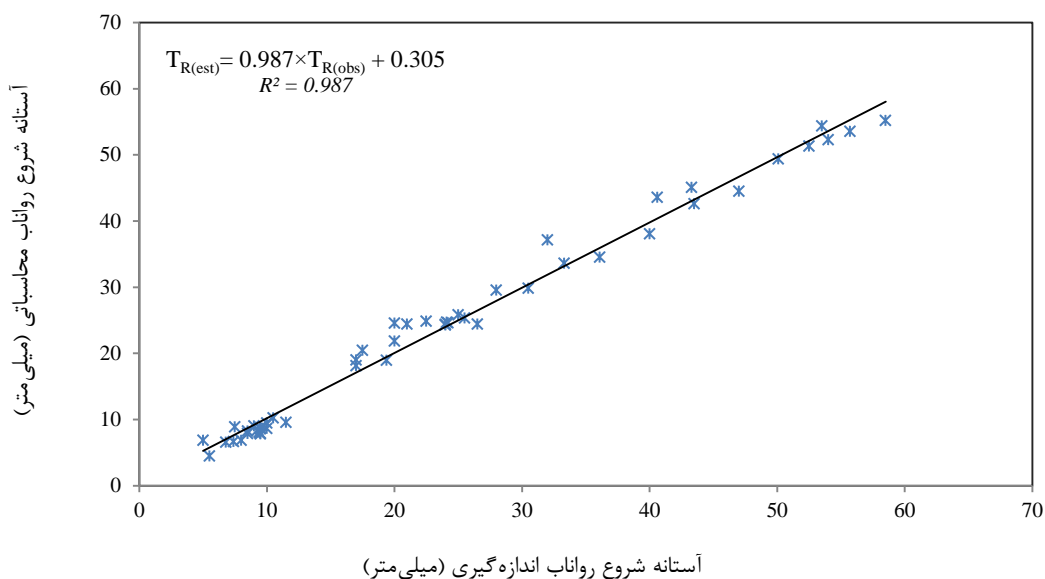
جدول ۴- معادلات رگرسیونی چند متغیره خطی بین عوامل مستقل و آستانه شروع رواناب

معادله	ضریب تبیین ( $R^2$ )	خطای استاندارد ( $S.E$ )	شماره معادله
$T_R = 0.89P - 0.057I + 0.025C + 0.018S + 0.055V - 0.0023 S_L - 2.44$	۰/۸۸	۱/۸۸	۱
$T_R = 0.879P + 0.046C + 0.027S + 0.05V - 0.019 S_L - 4.34$	۰/۹۸	۱/۸۷	۲
$T_R = 0.885P - 0.034I + 0.005S + 0.042V - 1.581$	۰/۹۸	۱/۸۷	۳
$T_R = 0.886P - 0.038I - 0.011C + 0.043V - 0.965$	۰/۹۸	۱/۸۶	۴
$T_R = 0.879P - 0.007C + 0.040V - 1.753$	۰/۹۸	۱/۸۵	۵
$T_R = 0.87P + 0.047V - 0.015 S_L - 1.899$	۰/۹۸	۱/۸۵	۶
$T_R = 0.872P - 0.009S + 0.014 S_L - 0.152$	۰/۹۸	۲/۰۱	۷
$T_R = 0.879P + 0.039V - 1.915$	۰/۹۸	۰/۸۴	۸
$T_R = 0.871P + 0.017 S_L - 0.524$	۰/۹۸	۲	۹
$T_R = 0.872P + 0.024C - 0.906$	۰/۹۸	۲/۰۱	۱۰

\*  $T_R$  آستانه شروع رواناب (میلی‌متر)،  $I$  شدت بارش (میلی‌متر در ساعت)،  $P$  عمق بارش (میلی‌متر)،  $C$  درصد رس،  $S$  درصد شن،  $V$  درصد پوشش گیاهی و  $S_L$  درصد شیب



شکل ۴- نمودار احتمال تجمعی مقادیر واقعی آستانه شروع رواناب نسبت به احتمال تجمعی مورد انتظار



شکل ۵- مقادیر آستانه شروع رواناب برآوردی چند متغیره خطی و اندازه‌گیری شده

بر اساس اصل تلخیص در مدل و دخالت حداقلی برآوردکننده‌ها با حفظ کارایی لازم برای یک مدل، نقش و تأثیر یک عامل از یک عامل به ترتیب عمق بارش از عامل اقلیمی، درصد بافت رسی از عامل خاکشناسی و درصد پوشش گیاهی از عامل زمینی، می‌توانند عوامل تعیین‌کننده خوبی برای آستانه شروع رواناب باشند. تاثیر بافت خاک در تغییر میزان رواناب در مقایسه با مطالعات Orsham و همکاران (۲۰۱۰)،

نتایج تحقیق بیانگر این است که مشارکت عامل خاکشناسی از نوع بافت رسی به همراه عامل اقلیمی عمق بارش نیز برآوردکننده مناسبی برای تعیین آستانه شروع رواناب تلقی می‌شوند، به نحوی که دخالت این دو نیز مدلی با دقت و کارایی لازم را ارائه می‌دهد. مشارکت حداکثری و توأمان عوامل موثر با یکدیگر خود نیز نشان از همبستگی معنی‌دار و بالایی نسبت به عامل وابسته آستانه شروع رواناب دارند. اما

به‌طور کلی، نتایج آزمون تحلیل عاملی از یک سو و مشخصه‌های آزمون‌های آماری بررسی دقت مدل-های برآوردی از سوی دیگر، مؤید میزان اهمیت و تأثیر عوامل یاد شده و علاوه بر آن قابلیت و کارایی مناسب مدل‌های استخراجی در این پژوهش است.

### تشکر و قدردانی

از همکاری و راهنمایی ارزشمند آقای دکتر محمدحسین مهدیان، آقای دکتر جهانگیر پرهت و همچنین، مدیران و کارشناسان محترم پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری که همکاری ارزنده‌ای برای اجرای این تحقیق مبذول نمودند، تشکر و قدردانی می‌شود.

در خاک‌های مورد بررسی نشان می‌دهد که با افزایش رطوبت تا حد ظرفیت زراعی در خاک‌های با بافت سبک، متوسط و سنگین به ترتیب کمترین تا بیشترین ضریب رواناب را داشته و در حالت نزدیک به اشباع، روند افزایشی رواناب در بافت سنگین کند و کمتر از بافت متوسط می‌شود که با نتیجه این مطالعه نیز همخوانی دارد. همچنین، تأثیر شدت بارش و میزان رواناب با ضریب تبیین ۳۶ درصد در مطالعات Arnaez و همکاران (۲۰۰۷)، در مقایسه با نتیجه این تحقیق نشان داد که علاوه بر شدت بارندگی انرژی جنبشی رگبار، مقاومت ذرات خاک در مقابل برخورد قطرات باران، میزان پوشش گیاهی و شیب بر میزان رواناب و آستانه آن تأثیرگذار می‌باشند.

### منابع مورد استفاده

1. Aghabeigi Amin, S., H.R. Moradi and B. Fattahi. 2014. Sediment and runoff measurement in different rangeland vegetation types using rainfall simulator. *Ecopersia*, 2(2): 525-538.
2. Arnaez, J., T. Lasanta, P. Ruiz-Flano and L. Ortigosa. 2007. Factors affecting runoff and erosion under simulated rainfall in Mediterranean Vineyards. *Soil and Tillage Research*, 93: 324-334.
3. Bloomfield, J.P., D.J. Allen and K.J. Griffiths. 2009. Examining geological controls on base flow index using regression analysis: An illustration from the Thames Basin, UK. *Journal of Hydrology*, 373(1-2): 164-176.
4. Castillo, V.M., A. Gomez-Plaza and M. Martinez-Mena. 2003. The role of antecedent soil water content in the runoff response of semi-arid catchments: a simulation approach. *Journal of Hydrology*, 284: 114-130.
5. Defersha, M.B. and A.M. Mellese. 2012. Effect of rainfall intensity, slope and antecedent moisture content on sediment concentration and sediment enrichment ratio. *Catena*, 90: 47-52.
6. Eslami, A.R. and B. Saghafian. 2008. The role of watershed morphometric and climatic factors in producing of flood flows. *Journal of Pajouhesh-va-Sazandegi in Natural Resources*, 78: 149-157 (in Persian).
7. Hawke, R.M., A.G. Price and R.B. Bryan. 2006. The Effect of initial soil water content and rainfall intensity on near-surface soil hydrologic conductivity: a laboratory investigation. *Catena*, 65: 237-246.
8. Kavian, A., A. Azmodeh, K. Soleimani and Gh. Vahabzadeh. 2010. Effect of soil properties on runoff and soil erosion in forest lands. *Journal of Range and Watershed Management, Iranian Journal of Natural Resources*, 63(1): 89-104 (in Persian).
9. Kazemi, R. and A. Eslami. 2013. Study role of geological formations and hydrological parameters on the based index, case study: Caspian area. *Journal of Watershed Engineering and Management*, 5(2): 85-93 (in Persian).
10. Khaledi Darvishan, A.V., S.H.R. Sadeghi, M. Homaee, and M. Arabkhedri. 2015. Affectability of runoff threshold and coefficient from rainfall intensity and antecedent soil moisture content in laboratorial erosion plots. *Iranian Water Research Journal*, 8(15): (under press, in Persian).
11. Martinez, M., J. Albaladejo and V.M. Castillo. 1998. Factors influencing surface runoff generation in a Mediterranean semi-arid environment. *Chicamo Watershed SE Spain. Hydrological Processes*, 12(5): 741-745.
12. Orsham, A., A.M. Akhund and A. Behnia. 2010. Effect of soil antecedent moisture contents on runoff and sedimentation values with simulated rainfall method. *Iranian journal of Range and Desert Research*, 16(4): 445-455.
13. Porhemat, J., A.A. Abbasi and E. Khoshbazzm. 2014. Investigating the relationship between runoff coefficient and rainfall intensity on pasture land, case study: Sanganeh Kalat. *Iranian Journal of Rainwater Catchment System*, 1(2): 23-33 (in Persian).
14. Raeesiyan, R. 2005. Investigation of slope, soil moisture conditions and land use in runoff generation

- time. Proceedings of 3rd Erosion and Sediment National Conference, 27-30 August 2005, Tehran, Iran, 305-309.
15. Seeger, M. 2007. Uncertainty of factors determining runoff and erosion processes as quantified by rainfall simulations. *Catena*, 71: 56-67.
  16. Sharifi, F., S. Safarpour and S.A. Ayoubzadeh. 2004. Evaluation of AWBM 2002 model in simulation of hydrologic processes in a number of Iranian catchments. *Pajouhesh-va-Sazandegi, Natural Resources*, 19(63): 35-42 (in Persian).
  17. Tabatabaee Yazdi, J., P. Rezaee and H. Khatami Mashhadi. 2009. Runoff regression models for small catchments. *Journal of Water and Soil*, 23(4): 193-204 (in Persian).
  18. Tahmasebi, R. 2002. Model of rainwater harvesting systems for arid and semi-arid zones. PhD Thesis, Tehran Science and Research Branch, Islamic Azad University, 123 pages.

## Runoff threshold estimation using rainfall simulator in field plots

Nadergholi Ebrahimi<sup>\*1</sup>, Alireza Eslami<sup>2</sup> and Fourod Sharifi<sup>3</sup>

<sup>1 and 2</sup> Assistant Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Iran and <sup>3</sup> Associate Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Iran

Received: 19 September 2014

Accepted: 25 March 2015

### Abstract

Climatic conditions in arid and semi-arid regions, poor vegetation cover and mountainous conditions of watersheds concentrates surface water as floodwater and cause vital and financial damages in industrial, urban and rural areas. Runoff threshold is one of most important factors in accurately estimation of flood volume and intensity for designing and securing constructive projects which saves expenses and leads to optimum dimensions of structures. In this research, rainfall simulator was used to investigate the effective factors on runoff threshold. Rainfall intensities of eight to 40 mm/h in periods of 15, 30, 60 and 120 minutes were simulated and runoff thresholds were measured. Acceptable methods for estimation of runoff threshold were introduced based on rainfall characteristics and pedology and geology parameters using measured data and multivariable linear and nonlinear regression methods. Results demonstrated that the rainfall volume and intensity as climatic factors, vegetation cover and slope as terrain factors and soil texture as pedologic factors are the most effective ones in runoff threshold. The relation of independent factors and their partnership in runoff threshold is statistically acceptable for the research area. The results showed a significant correlation ( $R^2=0.98$ ) between estimated and viewed runoff threshold.

**Key words:** Artificial rainfall, Excess rainfall, Infiltration capacity, Rainfall-runoff, Surface storage capacity

---

\* Corresponding author: nebrahimi81@yahoo.com