

## تغییرپذیری درون‌رگباری ضریب تغییرات حجم رواناب و هدررفت خاک طی تکرارهای شبیه‌سازی باران و فرسایش خاک

محبوبه کیانی هرچگانی<sup>۱</sup>، سید حمیدرضا صادقی<sup>۲\*</sup>، حسین اسدی<sup>۳</sup>

۱. دانش‌آموخته دکتری گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس

۲. استاد گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس

۳. دانشیار گروه علوم خاک، دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۱۳۹۵/۰۹/۱۰؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۵/۱۱/۲۷)

### چکیده

بررسی تغییرپذیری درون‌رگباری خصوصیات رواناب و هدررفت خاک به‌عنوان دو مقوله مهم فرایندهای هیدرولوژیکی، می‌تواند برای تصمیم‌گیری و فهم بهتر پاسخ‌های هیدرولوژیکی به متخصصان کمک کند. حال آنکه این مقوله در جهان و به‌ویژه کشورهای در حال توسعه کمتر مورد توجه بوده است. بنابراین، مطالعه حاضر برای ارزیابی اثر شیب‌ها و شدت‌های مختلف بارندگی بر تغییرپذیری درون‌رگباری ضریب تغییرات حجم رواناب و هدررفت خاک در سه تکرار برنامه‌ریزی شد. بدین‌منظور آزمایش‌ها در شبیه‌ساز باران و در پلات فرسایش خاک ۶ در ۱ متر با عمق ۰/۵ متر و در شیب‌های ۵، ۱۵ و ۲۵ درصد و شدت‌های باران ۳۰، ۶۰ و ۹۰ میلی‌متر بر ساعت روی یک نمونه خاک جمع‌آوری شده از مراتع حوضه آبخیز کجور در شمال ایران انجام پذیرفت. نتایج بیان‌کننده روند افزایشی ضریب تغییرات درون‌رگباری حجم رواناب و هدررفت خاک با افزایش شدت بارندگی در شیب ۵ و ۱۵ درصد بود. در حالی که هیچ روندی با افزایش شیب در شدت‌های مختلف بارندگی برای ضریب تغییرات درون‌رگباری حجم رواناب و هدررفت خاک غیر از ضریب تغییرات هدررفت خاک در شیب‌های مختلف در شدت بارندگی ۹۰ میلی‌متر بر ساعت مشاهده نشد. همچنین کمترین و بیشترین مقدار میانگین ضریب تغییرات درون‌رگباری حجم رواناب به ترتیب ۴/۸۰ و ۱۷/۱۰ و برای هدررفت خاک ۱۷/۲۸ و ۸۷/۹۶ درصد مشاهده شد. یافته‌های این پژوهش بر ضرورت لحاظ تغییرات درون‌رگباری متغیرهای رواناب و هدررفت خاک در تکرارهای مختلف و متناسب با شدت بارندگی و شیب در تحلیل فرایندهای حاکم بر سامانه آبخیز تأکید دارد.

**کلیدواژگان:** تغییرات زمانی، تولید رواناب، شبیه‌سازی هیدرولوژیک، رگبار، فرسایش بین شیاری.

## مقدمه

تغییرپذیری یک معیار مهم برآورد تعداد تکرار آزمایش‌ها برای برقراری فاصله مناسب داده‌ها از میانگین محسوب می‌شود. میزان پراکندگی داده‌های به‌دست‌آمده از مراحل مختلف فرایند فرسایش خاک با توجه به تعداد تکرار به‌زای میانگین که ضریب تغییرات<sup>۱</sup> داده‌ها محسوب می‌شود اهمیت اساسی در طراحی آزمایش‌ها، ارزیابی کارایی مدل‌های فرسایش خاک و درک بهتر رفتار مؤلفه‌های حاصل از فرایند فرسایش خاک دارد [۱ و ۲]. متأسفانه، تغییرپذیری داده‌های مربوط به تولید رواناب و فرسایش خاک در مراحل مختلف و تحت شرایط مختلف بسیار محدود بررسی شده است و میزان اعتماد به داده‌های مؤلفه‌های مختلف فرسایش خاک در تکرارهای مختلف همیشه مورد سؤال بوده است. عدم اطمینان‌های موجود در تغییرپذیری داده‌های هدررفت خاک و رواناب در تکرارهای مختلف می‌تواند تحت تأثیر تفاوت در خصوصیات خاک، شرایط بارندگی یا شرایط پلات قرار گیرد. همچنین تغییرات سطح خاک در طول آزمایش تحت تأثیر زاویه برخورد قطرات باران، سرعت و اندازه قطرات باران ویژگی‌های ذرات ناشی از شکست خاک‌دانه، تغییر در میزان زبری سطح خاک و میزان رطوبت اولیه خاک در هر تکرار متفاوت است [۱، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸ و ۹] و اجتناب از عدم اطمینان‌های ناشی از موارد یادشده در شرایط طبیعی یا شرایط آزمایشگاهی کار بسیار دشوار و غیر ممکن است [۱۰، ۱۱، ۱۲، ۲ و ۱۳]. بنابراین، بررسی تغییرات داده‌های فرسایش خاک با توجه به تکرار آزمایش‌ها به‌منظور توسعه علوم فرسایش خاک و نیز دستیابی به ابعاد مختلف تغییرپذیری زمانی درون و بین‌رگباری<sup>۲</sup> فرایندهای اصلی هیدرولوژیک، زمینه‌ساز درک بهتر سامانه آبخیز، مدل‌سازی صحیح‌تر و در نهایت مدیریت بهتر منابع حوضه‌های آبخیز خواهد شد. با وجود این، مطالعات انجام‌گرفته در خصوص ضرورت تعیین تعداد تکرار آزمایش‌ها کفایت کمی و کیفی مناسبی ندارد. بدین‌منظور ونث و همکارانش [۱۴] پژوهشی در زمینه بررسی تغییرپذیری داده‌های هدررفت خاک و رواناب در عرصه‌های طبیعی با تعداد داده و تکرار کافی انجام دادند. نتایج پژوهش آنها در ۴۰ پلات آیش با تیمارهای یکسان برای ۲۵ رگبار

رخ داده در یک دوره ۱۵۵ روزه نشان داد میزان بازه ضریب تغییرات هدررفت خاک و رواناب برای ۲۵ رگبار به‌ترتیب از ۱۸ تا ۹۱ درصد و ۷ تا ۱۰۹ درصد متغیر است و برای حدود ۱۵ واقعه رگبار کمتر از ۳۰ درصد به‌دست آمد.

راتیمان و همکارانش [۹] در پژوهشی در مزرعه ذرت و درون پلات، بازه ضریب تغییرات حجم رواناب و هدررفت خاک را به‌صورت فصلی در سه تکرار از ۳۰ تا ۵۰ درصد متغیر بیان کردند. همچنین نیرینگ [۲] بازه ضریب تغییرات ۱۴ تا ۱۵۰ درصد را به‌ترتیب برای هدررفت خاک اندازه‌گیری شده با مقادیر ۲۰ و ۰/۰۱ کیلوگرم بر مترمربع به‌دست آورد. بدین‌منظور گومز و همکارانش [۱] با استفاده از مدل‌سازی عددی حدود ۵۰ درصد ضریب تغییرات حجم رواناب در تکرارها را ناشی از ذخیره سطحی، عمق کفه رسی<sup>۳</sup> و هدایت هیدرولیکی اشباع و ۵۰ درصد دیگر را مربوط به خطای اندازه‌گیری در آزمایش‌ها بیان کردند. در سال‌های اخیر نیز باگارلو و فرو [۱۱] تغییرپذیری در داده‌های هدررفت خاک را ناشی از دو عامل تغییرپذیری طبیعی و تغییرپذیری ناشی از روش‌های اندازه‌گیری در پلات‌های با اندازه‌های مختلف بیان کردند. نتایج تحقیق آنها نیز بیان‌کننده تغییرپذیری ضریب تغییرات رواناب از ۷ تا ۳۶ درصد بود. همچنین نتایج تحقیق آنها نشان داد تغییرات متوسط هدررفت خاک ده برابر رواناب است و تحت تأثیر اندازه پلات، تعداد تکرار و نوع خاک نیست. همچنین آرمسترانگ و همکارانش [۵] نیز تغییرپذیری مؤلفه‌های فرسایش بین شیاری در شدت بارندگی ۴۷ میلی‌متر بر ساعت و در سه شیب ۳، ۶ و ۹ درصد را بررسی کردند و گفتند که تغییرات زیاد رواناب و غلظت رسوب در تکرارها ناشی از پیچیدگی‌های فرایند فرسایش بین شیاری، اتصال خاک سطحی<sup>۴</sup>، الگوهای جریان، رطوبت خاک و عمق رواناب بوده است. هو و همکارانش [۱۵] نیز تغییرات درون‌رگباری حجم رواناب و غلظت رسوب حاصل از فرسایش بین شیاری در یک واقعه بارندگی با شدت ۳۰ میلی‌متر بر ساعت با ۱۰ تکرار در دو نوع خاک متفاوت را بررسی کردند. نتایج پژوهش آنها بیان‌کننده افزایش ضریب تغییرات حجم رواناب و غلظت رسوب در دو نوع خاک در دقایق اولیه شروع بارندگی در بازه ۸۲ تا ۱۶۳ درصد در دو

3. Depth to claypan  
4. Surface area connectivity

1. Coefficient of variation  
2. Intra/Inter variability

کجور با دوره بازگشت ۲۵ تا ۳۰ سال برای منطقه اجرا شد. در این آزمایش‌ها از آب چاه با pH ۷/۲۷، هدایت الکتریکی ۵/۱۲ میلی‌زیمنس بر متر، اکسیژن محلول ۳۰/۷ درصد، فسفر ۰/۱۷ میلی‌گرم بر لیتر و نیترات ۴/۴۱ میلی‌گرم بر لیتر برای شبیه‌سازی باران استفاده شد. میانگین توان باران در شیب‌های ۳، ۹ و ۱۵ درجه و برای شدت‌های بارش ۳۰، ۶۰ و ۹۰ میلی‌متر بر ساعت با میانگین اندازه قطرات باران به ترتیب ۱/۵، ۱/۵۷ و ۱/۵۸ میلی‌متر و هم‌چنین سرعت متناظر ۶/۸۶، ۶/۹۱ و ۶/۶۷ متر بر ثانیه [۱۸] به ترتیب ۰/۱۹، ۰/۳۹ و ۰/۵۴ وات بر مترمربع به دست آمد و میانگین توان رواناب نیز به ترتیب ۰/۱۷، ۰/۳۳ و ۰/۴۷ وات بر متر مربع به دست آمد [۲۵].

#### آماده‌سازی پلات‌های فرسایشی و مشخصات خاک استفاده‌شده

نمونه خاک برداشت‌شده به آزمایشگاه منتقل و آماده‌سازی خاک مثل هواخشک کردن تا حد رطوبت بهینه و حذف سنگ‌ریزه و بقایای گیاهی انجام و از الک ۸ میلی‌متری عبور داده و به خوبی مخلوط شد. برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک استفاده‌شده در آزمایش‌ها مانند درصد ماسه، لای و رس، جرم مخصوص ظاهری، واکنش خاک، هدایت الکتریکی، ماده آلی و رطوبت حجمی برای حذف اثر رطوبت پیشین در زمان نمونه‌برداری اندازه‌گیری شد. مقادیر این ویژگی‌ها به ترتیب ۳۴/۳ درصد، ۵۲/۸ درصد و ۱۲/۹ درصد، ۱/۴۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب، ۷/۶۵، ۷/۶۴ میلی‌زیمنس بر متر، ۲/۶۱ درصد و ۱۲±۳ درصد به دست آمد [۲۶]. قبل از انتقال خاک به درون پلات، لایه زهکشی از جنس پوکه معدنی به صورت تغییر تدریجی اندازه ذرات از بادامی تا ریزدانه از عمق به سطح به ضخامت ۲۰ سانتی‌متر در کف پلات تعبیه شد. نمونه خاک مد نظر در دو لایه ۵ سانتی‌متری در پلات ریخته شد و تا رسیدن به جرم مخصوص ظاهری خاک منطقه مادری با لوله پی‌وی‌سی پر شده از سیمان غلتک زده شد. بعد از ریخته‌شدن لایه اول، خاک به صورت عرضی شیار داده‌شده تا از انقطاع بین لایه اول و دوم جلوگیری شود، سپس آزمایش‌های یادشده در سه تکرار و در پلات آزمایش و روی خاک‌های آماده‌شده اجرا شد. بعد از هر آزمایش ۳ تا ۷ سانتی‌متر از خاک مد نظر در پلات برای آزمایش‌های بعدی تعویض شد [۵] در

نوع خاک داشت و با گذشت زمان ضریب تغییرات حجم رواناب و غلظت رسوب در تکرارهای مختلف به ترتیب در بازه ۱۰ تا ۱۸ درصد و ۱۵ تا ۳۹ درصد به دست آمد. با توجه به اینکه بیشتر پژوهش‌های ارائه‌شده در محیط‌های طبیعی و تحت تأثیر پیچیدگی‌ها و البته برخی محدودیت‌های شرایط محیطی به بررسی تغییرپذیری مؤلفه‌های فرسایش و اثر تعداد تکرار در آنها پرداخته‌اند برای درک بهتر فرایندها در شرایط مختلف و در نتیجه بررسی اثر تکرار در تغییرپذیری مؤلفه‌های فرسایش خاک نیاز به تسهیل و ساده‌سازی شرایط در محیط‌های آزمایشگاهی شبیه‌سازی شده برای به حداقل رساندن پیچیدگی‌ها ضرورت می‌یابد. هم‌چنین با توجه به نیاز پژوهشگران مختلف برای کسب اطمینان درباره نتایج به دست آمده از تکرارهای مختلف وقایع بارندگی شبیه‌سازی شده در شرایط مختلف و تعیین تعداد تکرار مناسب برای افزایش سطح اعتماد و درک بهتر و صحیح‌تر فرایندهای فرسایش خاک و تأثیر آنها در ارائه دقیق‌تر مدل‌های فرسایش خاک تحقیق حاضر با هدف بررسی تغییرپذیری کمی ضریب تغییرات حجم رواناب و هدررفت خاک ناشی از فرسایش بین شیب‌های در هر واقعه رگباری در شبیه‌ساز باران و فرسایش خاک و با سه تکرار در شیب‌ها و شدت‌های مختلف بارندگی برنامه‌ریزی و انجام شد.

#### مواد و روش‌ها

##### آماده‌سازی شبیه‌ساز باران و آب استفاده‌شده

برای انجام پژوهش حاضر کلیه شبیه‌سازی باران‌ها روی پلات‌های متوسط آزمایشگاهی با طول و عرض به ترتیب ۶ و ۱ متر با توجه به امکانات موجود در آزمایشگاه شبیه‌ساز باران و فرسایش خاک دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تربیت مدرس و در حداقل سه تکرار مورد نیاز برای انجام آنالیزهای آماری، سوابق پژوهشی مختلف [۱۶-۲۴]، محدودیت اعتبار و زمان روی یک نمونه خاک برداشت‌شده از منطقه‌ای واقع در مراتع بیلاقی دامنه‌های شمالی البرز در حد فاصل جاده کدیر- کجور به ترتیب با طول شرقی و عرض شمالی جغرافیایی ۴۴' ۵۱° و ۲۴' ۳۶° انجام پذیرفت.

آزمایش‌ها در شدت‌های بارندگی ۳۰، ۶۰ و ۹۰ میلی‌متر بر ساعت با دوام‌های به ترتیب ۳۰، ۱۵ و ۱۰ دقیقه متناسب با هریک از شدت‌های یادشده با استفاده از نمودارهای شدت، مدت و فراوانی تهیه‌شده در ایستگاه باران‌نگاری

هر دقیقه برای سه تکرار است و تعیین فاصله اطمینان<sup>۱</sup> میانگین تعداد تکرارها از رابطه ۲ به دست می‌آید:

$$n_R = \left[ \frac{Z_{\alpha/2} \sigma}{\eta \mu} \right]^2 = \left[ \frac{Z_{\alpha/2} C_v}{\eta} \right]^2 \quad (2)$$

چون در جامعه نرمال، فاصله به صورت  $a < \mu < b$  است لذا احتمال آن برابر  $1 - \alpha$  است و با توجه به این که توزیع نرمال قرینه است بهترین حالت انتخاب فاصله اطمینان به صورت  $(-Z_{\alpha/2} < Z < Z_{\alpha/2}) = 1 - \alpha p$  در رابطه یاد شده  $n_R$  بیان کننده فاصله اطمینان میانگین با تکرار مشخص،  $Z_{\alpha/2}$  ضریب تعمیم در جدول توزیع نرمال،  $\eta$  درجه دقت مورد انتظار به عنوان بخشی از میانگین مد نظر قرار گرفت [۲] و از رابطه ۳ محاسبه شد.

$$\eta = \frac{Z_{\alpha/2} C_v}{\sqrt{n_R}} \quad (3)$$

بدین منظور نرمال بودن داده‌ها با استفاده از آزمون کولموگروف اسمیرنوف تأیید و ضریب تغییرات حجم رواناب و هدررفت خاک کل واقعه رگبار در شیب‌ها و شدت‌های مختلف بارندگی با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شد. در نهایت، درجه دقت مورد انتظار در فاصله اطمینان ۹۰، ۹۵ و ۹۹ درصد با  $Z_{\alpha/2}$  به ترتیب ۱/۶۴۵، ۱/۹۶ و ۲/۵۷۶ برای داده‌های حجم رواناب و هدررفت خاک در سه تکرار در شرایط مختلف با استفاده از رابطه ۳ به دست آمد.

### نتایج و بحث

بعد از اندازه‌گیری و ثبت داده‌های حجم رواناب (میلی مترمکعب بر ثانیه) و هدررفت خاک (گرم بر مترمربع بر ساعت) الگوی تغییرات زمانی مقادیر آنها در سه تکرار و میانگین آنها رسم و در شکل‌های ۱ و ۲ ارائه شده است. همچنین نتایج ضریب تغییرات (درصد) و درجه دقت مورد انتظار در فاصله اطمینان ۹۰، ۹۵ و ۹۹ درصد برای داده‌های حجم رواناب و هدررفت خاک در شیب‌های مختلف پلات و شدت‌های بارندگی در سه تکرار در جدول ۱ خلاصه شده است. دقت در شکل ۱ بیان کننده افزایش حجم رواناب با افزایش شیب‌ها و شدت‌های مختلف بارندگی است. با افزایش شیب در شدت‌های بارندگی یکسان فاصله داده‌های اندازه‌گیری شده حجم رواناب در سه تکرار با خط میانگین بسیار کم است، اما با افزایش شدت بارندگی به خصوص در

ادامه و قبل از شروع هر بار آزمایش، نمونه خاک برای رسیدن به رطوبت طبیعی منطقه با یک بارش غیرفرساینده با شدت ۵ میلی‌متر در ساعت مرطوب شد [۲۲ و ۲۵].

### اندازه‌گیری رواناب و رسوب

برای بررسی فرایند تولید رواناب، زمان ظهور اولین نشانه‌های رواناب در خروجی هر پلات به عنوان مراحل اولیه تولید رواناب و اثر مشترک بارندگی و جریان در ایجاد فرسایش و انتقال رسوبات با استفاده از زمان سنج ثبت و سپس حجم رواناب در فواصل زمانی یک دقیقه‌ای و به طور کلی در سه تکرار اندازه‌گیری شد. بعد از هر سری آزمایش، خاک سطحی درون پلات به طور کامل تخلیه و آماده‌سازی و بازسازی شرایط اولیه پلات برای انجام آزمایش‌های سری بعد صورت پذیرفت. نمونه‌های رواناب و رسوب از خروجی پلات در هر واقعه باران با توجه به شیب و شدت‌های مختلف بارندگی استفاده شده، با فاصله زمانی یک دقیقه و با استفاده از بشرهای یک لیتری برداشت شد. سپس غلظت رسوب در فرسایش بین‌شیاری به روش برجاگذاری به مدت ۲۴ ساعت و تخلیه آبرویی و در نهایت خشک کردن رسوب تغلیظ شده در دمای ۱۰۵ درجه آون مشخص شد [۱۹]. پس از اندازه‌گیری غلظت رسوب از تقسیم آن به زمان و مساحت پلات، هدررفت خاک در هر دقیقه برای هر رگبار به دست آمد. سپس داده‌های به دست آمده از حجم رواناب و غلظت رسوب در هر واقعه رگبار در 2010 Excel دسته‌بندی و بانک اطلاعاتی آنها تهیه شد.

### تجزیه و تحلیل داده‌ها

برای تحلیل تغییرپذیری از مفهوم دقت اندازه‌گیری و ضریب تغییرات به عنوان شاخص دقت تکرارپذیری آزمایش‌ها [۲۷] استفاده شد. در دقت اندازه‌گیری، نزدیکی بین مقادیر کمی به دست آمده از آزمون‌های مکرر به وسیله تجهیزات مشابه تحت شرایط یکسان مد نظر قرار گرفت و با دو مؤلفه تکرارپذیری و تجدیدپذیری تفکیک شد. دقت اندازه‌گیری در شرایط معین اندازه‌گیری مطالعه شده با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شد:

$$C_v = \frac{\sigma}{\mu} \times 100 \quad (1)$$

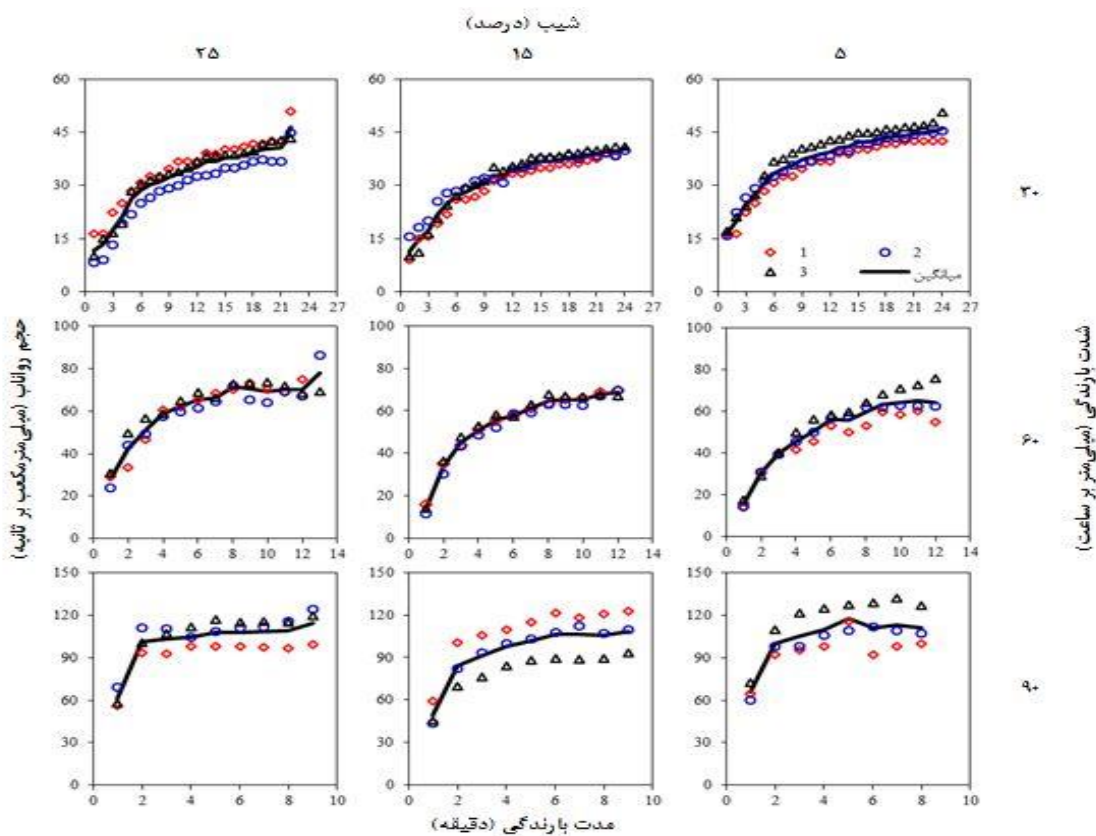
که در آن،  $C_v$  بیانگر ضریب تغییرات،  $\sigma$  انحراف معیار داده‌ها و  $\mu$  میانگین داده حجم رواناب یا هدررفت خاک در

بیشتر در ضریب تغییرات درون رگباری هدررفت خاک منجر شده‌اند. همچنین پیچیدگی بیشتر فرایند تولید رسوب در مقایسه با ایجاد رواناب را می‌توان به‌عنوان دلیل دیگری برای رخداد ضریب تغییرات نسبی بیشتر تولید رسوب طی آزمایش‌ها محسوب کرد که با اظهارات باگارلو و فرو [۱۱]، صادقی و همکارانش [۲۸] و نیرینگ و همکارانش [۲] در این خصوص مطابقت دارد. همچنین دقت در نتایج جدول ۱ نشان‌دهنده روند افزایشی ضریب تغییرات حجم رواناب و هدررفت خاک با افزایش شدت بارندگی در شیب ۵ و ۱۵ درصد بود. در حالی که هیچ روندی با افزایش شیب در شدت‌های مختلف بارندگی برای ضریب تغییرات درون رگباری حجم رواناب و هدررفت خاک غیر از روند کاهش ضریب تغییرات هدررفت خاک در شیب‌های مختلف در شدت بارندگی ۹۰ میلی‌متر بر ساعت مشاهده نشد به‌گونه‌ای که نمودار ضریب تغییرات درون رگباری هدررفت خاک در شدت بارندگی ۹۰ میلی‌متر بر ساعت (شکل ۳) نیز بیان‌کننده کاهش ضریب تغییرات از حدود ۱۰۰ درصد به حدود ۲۵ درصد در شیب ۵ نسبت به ۲۵ درصد است که حدود ۴ برابر کمتر شده است که می‌تواند ناشی از افزایش توان رواناب در ایجاد الگوی جریان متکامل‌تر و نیز انتقال ذرات درشت با اندازه‌های همسان‌تر متأثر از نیروی گرانشی زمین و ایجاد اتصال‌های خاک سطحی بیشتر در شیب ۲۵ درصد در سه تکرار باشد و در نتیجه کاهش ضریب تغییرات درون رگباری آن را به‌همراه داشته است.

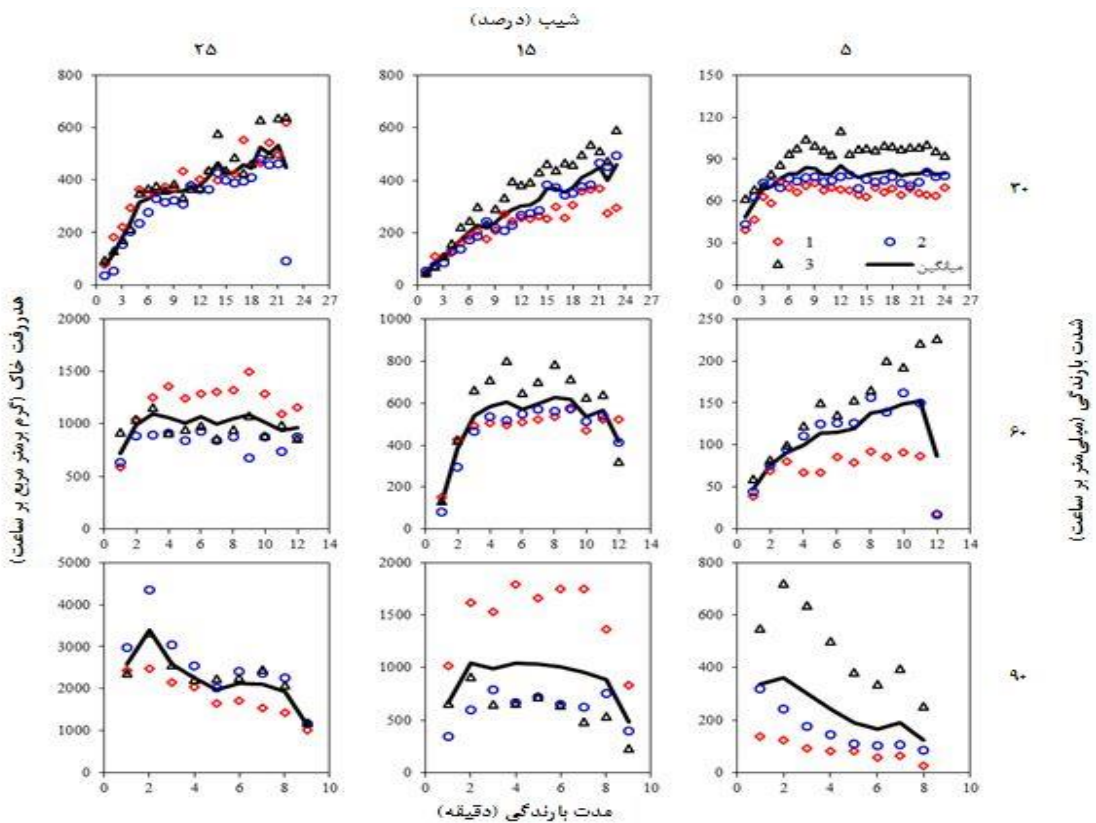
دقت در نتایج جدول ۱ بیان‌کننده کمترین و بیشترین مقدار میانگین ضریب تغییرات درون رگباری حجم رواناب به‌ترتیب ۴/۸۰ و ۱۷/۱۰ و برای هدررفت خاک ۱۷/۲۸ و ۸۷/۹۶ درصد در شیب‌ها و شدت‌های مختلف بارندگی است که با یافته‌های هو و همکارانش [۱۵] درباره بازه ضریب تغییرات رواناب و ونث و همکارانش [۱۴] درباره بازه ضریب تغییرات هدررفت خاک همسو است. همچنین نتایج جدول ۱ بیان‌کننده کمترین و بیشترین درجه دقت مورد انتظار برای میانگین داده‌های حجم رواناب در شیب‌ها و شدت‌های مختلف بارندگی در سه تکرار در فاصله اطمینان ۹۹ درصد (جدول ۱) به‌ترتیب مثبت و منفی ۷/۱۴ و ۲۵/۴۳ درصد است که با افزایش فاصله اطمینان به ۹۵ و ۹۰ درصد درجه دقت مورد انتظار نیز افزایش پیدا می‌کند. بدین منظور درجه دقت مورد انتظار

شدت بارندگی ۹۰ میلی‌متر بر ساعت این فاصله افزایش می‌یابد؛ به‌گونه‌ای که میانگین ضریب تغییرات تقریباً دو برابر شده است (جدول ۱). دلیل آن را می‌توان تأثیرپذیری حجم رواناب از شدت بارندگی ( $P \leq 0/00$ ) و عدم تأثیرپذیری آن از شیب‌های مختلف ( $P > 0/00$ ) بیان کرد [۱۹] که با یافته‌های آقاسی و بردفورد [۳] مبنی بر تغییرپذیری بین تکرارها از شرایط بارندگی همخوانی دارد. همچنین با توجه به شکل ۲ تغییرات درون رگباری مقادیر هدررفت خاک در سه تکرار از شیب‌های مختلف بیشتر از شدت‌های مختلف بارندگی بوده است که با یافته‌های آرمسترانگ و همکارانش [۵] مبنی بر تغییرات زیاد رسوب در تکرارها ناشی از پیچیدگی‌های فرایند فرسایش بین شیار، اتصال خاک سطحی، الگوهای جریان، رطوبت خاک و عمق رواناب همسو است.

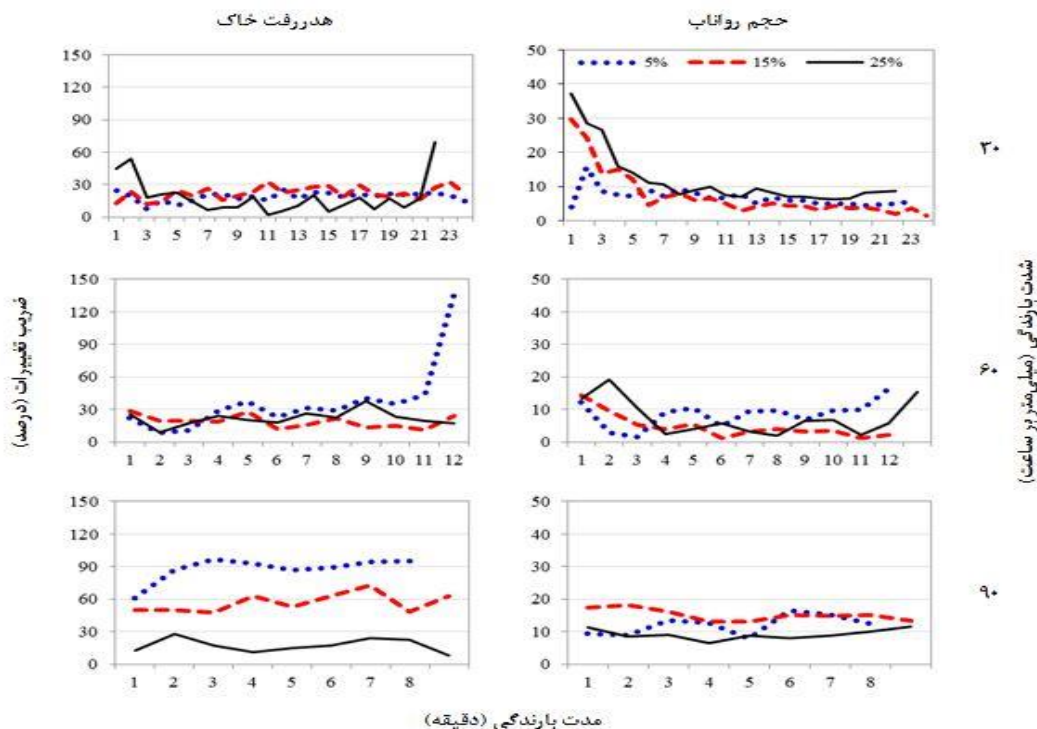
تغییرات درون رگباری ضریب تغییرات محاسبه‌شده حجم رواناب و هدررفت خاک در شیب‌ها و شدت‌های مختلف بارندگی برای هر واقعه رگباری در شکل ۳ ارائه شده است. دقت در شکل ۳ نشان‌دهنده افزایش ضریب تغییرات درون رگباری حجم رواناب و هدررفت خاک در شدت‌های بارندگی ۳۰ و ۶۰ میلی‌متر بر ساعت در شیب‌های مختلف در دقایق اولیه دارد که با یافته‌های هو و همکارانش [۱۵] در این‌باره همسو است. دقت در نمودارهای ارائه‌شده نشان‌دهنده افزایش ضریب تغییرات حجم رواناب در شدت بارندگی ۳۰ و ۶۰ میلی‌متر بر ساعت به‌ترتیب تا دقیقه هفتم و سوم بود که به‌نوعی متأثر از حالت ناپایدار رواناب در دقایق اولیه وقایع رگبار [۱۲] و [۱۵] و ذخیره سطحی [۱] دارد، اما در شدت بارندگی ۹۰ میلی‌متر بر ساعت در شیب‌های مختلف ۵، ۱۵ و ۲۵ درصد به‌دلیل پاسخ‌های هیدرولوژیکی سریع در فرایند فرسایش در مقیاس پلات [۱۱] این تغییرات در ابتدای وقایع رگباری خیلی مشهود نیست. دقت در نمودارهای مربوط به حجم رواناب و هدررفت خاک بیان‌کننده میزان نوسان بیشتر در هدررفت خاک نسبت به رواناب است. دلیل این امر را می‌توان ناشی از فرایند انتخابی حاکم بر فرایند در طول فرایند فرسایش بین شیار و به‌تبع انتقال ذرات رسوبی با اندازه‌های متفاوت و ایجاد تغییر در وزن رسوب انتقالی دانست. به‌طوری که رسوب‌های با اندازه کوچک‌تر در شدت بارندگی ۳۰ و ۶۰ میلی‌متر بر ساعت در طول فرایند فرسایش به‌دلیل نیاز به توان کم باران و رواناب منتقل شده و ذرات بزرگ‌تر در انتهای واقعه رگباری به سرریز پلات رسیده و به ایجاد تغییرات



شکل ۱. الگوی تغییرات زمانی درون‌رگباری حجم رواناب در سه تکرار در شیب‌ها و شدت‌های مختلف بارندگی در فرسایش بین شیاری



شکل ۲. الگوی تغییرات زمانی درون‌رگباری هدررفت خاک در سه تکرار در شیب‌ها و شدت‌های مختلف بارندگی در فرسایش بین شیاری



شکل ۳. تغییرات درون رگباری ضریب تغییرات حجم رواناب و هدررفت خاک در شیب‌ها و شدت‌های مختلف بارندگی

برای میانگین داده‌های هدررفت خاک نسبت به رواناب کاهش چشم‌گیری را نشان می‌دهد به گونه‌ای که نتایج جدول ۱ نشان‌دهنده کمترین و بیشترین درجه دقت مورد انتظار برای میانگین آن به ترتیب مثبت و منفی ۲۵/۷۰ و ۱۳۰/۸۲ درصد در سطح ۹۹ درصد است. نتایج به دست آمده از جدول ۱ نیز بیان‌کننده حداکثر مثبت و منفی ۲۵ درصد درجه دقت مورد انتظار برای میانگین حجم رواناب در سه تکرار در فاصله اطمینان ۹۹ درصد در شیب‌ها و شدت‌های مختلف بارندگی بود؛ اما برای هدررفت خاک در شیب‌ها و شدت‌های مختلف بارندگی با حداکثر مثبت و منفی ۳۵ درصد درجه دقت مورد انتظار برای میانگین آن در سه تکرار در فاصله اطمینان ۹۰ درصد غیر از شیب‌های ۵ و ۱۵ درصد در شدت بارندگی ۹۰ میلی‌متر بر ساعت تأیید شد.

میانگین حجم رواناب در سه تکرار در فاصله اطمینان ۹۹ درصد در شیب‌ها و شدت‌های مختلف بارندگی بود؛ اما برای هدررفت خاک در شیب‌ها و شدت‌های مختلف بارندگی با حداکثر مثبت و منفی ۳۵ درصد درجه دقت مورد انتظار برای میانگین آن در سه تکرار در فاصله اطمینان ۹۰ درصد غیر از شیب‌های ۵ و ۱۵ درصد در شدت بارندگی ۹۰ میلی‌متر بر ساعت تأیید شد.

جدول ۱. نتایج ضریب تغییرات (درصد) و درجه دقت مورد انتظار در فاصله اطمینان ۹۰، ۹۵ و ۹۹ درصد برای داده‌های حجم رواناب و هدررفت خاک در شیب‌های مختلف پلات و شدت‌های بارندگی در سه تکرار

مؤلفه‌ها	شدت بارندگی (میلی‌متر بر ساعت)									
	۹۰			۶۰			۳۰			
شیب (درصد)	۲۵	۱۵	۵	۲۵	۱۵	۵	۲۵	۱۵	۵	
حجم رواناب (میلی‌متر مکعب بر ثانیه)	ضریب تغییرات	۹/۲۳	۱۵/۱۳	۱۷/۱۰	۷/۵۲	۴/۸۰	۸/۵۹	۱۱/۹۰	۷/۴۴	۶/۸۹
	۹۰ درصد	۸/۷۷	۱۴/۳۷	۱۶/۲۴	۷/۱۴	۴/۵۶	۸/۱۶	۱۱/۳۰	۷/۰۷	۶/۵۴
	۹۵ درصد	۱۰/۴۴	۱۷/۱۲	۱۹/۳۵	۸/۵۱	۵/۴۳	۹/۷۲	۱۳/۴۷	۸/۴۲	۷/۷۹
۹۹ درصد	۱۳/۷۳	۲۲/۵۰	۲۵/۴۳	۱۱/۱۸	۷/۱۴	۱۲/۷۸	۱۷/۷۰	۱۱/۰۷	۱۰/۲۵	
هدررفت (گرم بر مترمربع بر ساعت)	ضریب تغییرات	۱۷/۲۸	۵۶/۷۰	۸۷/۹۶	۲۱/۷۴	۱۹/۰۳	۳۷/۳۱	۱۷/۸۱	۲۱/۳۹	۱۸/۸۴
	۹۰ درصد	۱۶/۴۱	۵۳/۸۵	۸۳/۵۴	۲۱/۶۵	۱۸/۰۷	۳۵/۴۳	۱۶/۹۱	۲۰/۳۱	۱۷/۸۹
	۹۵ درصد	۱۹/۵۵	۶۴/۱۶	۹۹/۵۳	۲۴/۶۰	۲۱/۵۳	۴۲/۲۲	۲۰/۱۵	۲۴/۲۰	۲۱/۳۲
۹۹ درصد	۲۵/۷۰	۸۴/۳۳	۱۳۰/۸۲	۳۲/۳۳	۲۸/۳۰	۵۵/۴۹	۲۶/۴۹	۳۱/۸۱	۲۸/۰۲	

## نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف بررسی میزان تغییرپذیری درون‌رگباری ضریب تغییرات حجم رواناب و هدررفت خاک در شیب‌های ۵، ۱۵ و ۲۵ درصد و شدت‌های مختلف بارندگی ۳۰، ۶۰ و ۹۰ میلی‌متر بر ساعت در سه تکرار انجام شد. نتایج بیان‌کننده میانگین ضریب تغییرات درون‌رگباری کمتر از ۱۸ درصد برای حجم رواناب و کمتر از ۳۸ درصد برای هدررفت خاک در شیب‌های مختلف و در شدت‌های بارندگی ۳۰ و ۶۰ میلی‌متر بر ساعت با سه تکرار بود. نتایج این پژوهش نشان‌دهنده تأثیرپذیری بسیار کم ضریب تغییرات حجم رواناب از تعداد تکرار در شرایط مختلف به‌خصوص با تغییرات شیب در شرایط شبیه‌ساز باران همراه بود؛ در حالی که ضریب تغییرات هدررفت خاک دارای تغییرپذیری درون‌رگباری زیاد به‌خصوص در شدت بارندگی ۹۰ میلی‌متر بر ساعت بود که می‌تواند ناشی از کنش و انتقال بیشتر ذرات با اندازه‌های بزرگ‌تر به دلیل افزایش توان باران و رواناب و در نتیجه ایجاد الگوهای مختلف حرکتی و اتصال خاک سطحی در سطح پلات باشد. بنابراین، پیشنهاد می‌شود برای به حداقل رساندن عدم اطمینان‌های داده‌های هدررفت خاک در شدت‌های زیاد بارندگی، تعداد تکرار آزمایش‌ها افزایش یابد. همچنین برای دستیابی به جمع‌بندی‌های جامع درباره تغییرپذیری ضریب تغییرات مؤلفه‌های فرسایش نیاز به انجام مطالعات گسترده‌تر هم در شرایط آزمایشگاهی و هم در شرایط طبیعی در مقیاس‌های مختلف مکانی و زمانی با تعداد تکرار بیشتر برای انتخاب تعداد تکرار بهینه توصیه می‌شود.

## منابع

- [5]. Armstrong A, Quinton JN, Heng BCP, Chandler JH. Variability of interrill erosion at low slopes. *Earth Surf. Proc. Land*. 2011; 36(1): 97-106.
- [6]. Dunkerley D. Rain event properties in nature and in rainfall simulation experiments: a comparative review with recommendations for increasingly systematic study and reporting. *Hydrol. Process*. 2008; 22: 4415-4435.
- [7]. Govers G. Rill erosion on arable land in central Belgium: rates, controls and predictability. *Catena* 1991; 18; 133-155.
- [8]. Heil JW, Juo ASR, McInnes KJ. Soil properties influencing surface sealing of some sandy soils in the Sahel. *Soil Sci*. 1997; 162: 459-469
- [9]. Le Bissonnais Y. Experimental study and modelling of soil surface crusting processes. *Catena* 1990; 17:13-28
- [10]. Ajayi AE, Horta IDMF. The effect of spatial variability of soil hydraulic properties on surface runoff processes. *Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, 2007; p. 3243-3248.
- [11]. Bagarello V, Ferro V. Plot- scale measurement of soil erosion at the experimental area of Sparacia (southern Italy). *Hydrol. Process*. 2004; 18(1): 141-157.
- [12]. Hu Y, Fister W, Kuhn NJ. Temporal variation of SOC enrichment from interrill erosion over prolonged rainfall simulations. *Agri*. 2013; 3: 726-740
- [13]. Toy TJ, Foster GR, Renard KG. *Soil Erosion: Processes, Prediction, Measurement, and Control*. John Wiley and Sons, New York, USA, 2002.
- [14]. Wendt RC, Alberts EE, Hjelmfelt AT. Variability of runoff and soil loss from fallow experimental plots. *Soil Sci Soc Am J*. 1986; 50:730-736.
- [15]. Hu Y, Fister W, Kuhn NJ. Inherent interreplicate variability during small-scale rainfall simulations. *J Soil Sed*. 2016; 16(6): 1809-1814.
- [16]. Hudson NW. Field measurement of soil erosion and runoff. *FAO Soils Bulletins*, Silsoe Associates, Amptill, Bedford UK, 1993; 68.
- [17]. Khaledi Darvishan A, Homayounfar V, Sadeghi SHR. The impact of soil preparation on the soil erosion rates under laboratory conditions. *Solid Earth*. 2015; 7: 885-907.
- [18]. Khaledi Darvishan A, Sadeghi SHR, Homae M, Arabkhedri M. Measuring sheet erosion using synthetic colorcontrast aggregates. *Hydrol. Process*. 2014; 28(15): 4463-4471.
- [1]. Gómez JA, Nearing MA, Giráldez JV, Alberts EE. Analysis of sources of variability of runoff volume in a 40 plot experiment using a numerical model. *J. Hydrol*. 2001; 248(1): 183-197.
- [2]. Nearing MA, Govers G, Norton LD. Variability in soil erosion data from replicated plots. *Soil Sci Soc Am J*. 1999; 63:1829-1835.
- [3]. Agassi M, Bradford JM. Methodologies for interrill soil erosion studies. *Soil Till. Res*. 1999; 49:277-287
- [4]. Anderson K, Kuhn NJ. Variations in soil structure and reflectance during a controlled crusting experiment. *Int J Remote Sens*. 2008; 29: 3457-3475



- [19]. Kiani Harchegani M, Sadeghi SHR, Asadi H. Changeability of concentration and particle size distribution of effective sediment in initial and mature flow generation conditions under different slopes and rainfall intensities, Iranian J Water. Eng. Manag. 2016; Accepted. [Persian]
- [20]. Parlak A, A. Özarslan Parlak. Measurement of splash erosion in different cover crops. Turk. J. Field Crops. 2010; 15(2):169–173.
- [21]. Rüttimann M, Schaub D, Prasuhn V, Rüegg W. Measurement of runoff and soil erosion on regularly cultivated fields in Switzerland—some critical considerations. Catena. 1995; 25:127–139.
- [22]. Sadeghi SHR, Kiani Harchegani M, Asadi H. Variability of particle size distributions of upward/downward splashed materials in different rainfall intensities and slope. Geoderma. 2017; 290: 100-106.
- [23]. Shi ZH, Fang NF, Wu FZ, Wang L, Yue BJ, Wu G. L. Soil erosion processes and sediment sorting associated with transport mechanisms on steep slopes. J. Hydrol. 2012; 454: 123-130.
- [24]. Sadeghi SHR, Kiani Harchegani M. Effects of sand mining on suspended sediment particle size distribution in Kojour forest river, Iran. J Agri. Sci. Tech. 2012; 14: 1637-1646.
- [25]. Sadeghi SHR, Kiani Harchegani M, Asadi H. Splash particle size distribution along the experimental plot under different rainfall intensities and slopes, Iranian J Water Soil Res. 2016; 47 (4): 657-664. [Persian]
- [26]. Kiani Harchegani M, Sadeghi SHR, Asadi H. Comparative analysis of the effects of rainfall intensity and experimental plot slope on Raindrop Impact Induced Erosion (RIIE). Iranian J Water Soil Res. 2016; 46(4): 631-640. [Persian]
- [27]. ISO 5725-1 Guidance for the Use of repeatability, reproducibility, and trueness estimates in measurement uncertainty estimation. Geneva, Switzerland: ISO; 2004.
- [28]. Sadeghi SHR, Saeidi P, Noor H, Raeisi MB. Understanding sediment yield process in a Hyrcanian forest watershed. In International Conference Land Conservation LANDCON. May 26-30, Tara Mountain/Serbia. 2009; (Vol. 905).