

## تحلیل حلقه‌های سنج رسوبی فرسایش بین‌شیاری در رگبارهای پیاپی تحت شرایط آزمایشگاهی

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

۱. پژوهشگر پسادکتری گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس

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

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

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۲/۲۱ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۶/۶/۲۰ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۶/۷/۱۰)

### چکیده

رسوب‌نمودها و حلقه‌های سنج رسوب به‌عنوان ابزارهایی مهم و مناسب در تحلیل رفتار رسوب با تغییرات دبی و درک نقش کنترل‌کنندگی دبی در تولید رسوب در وقایع رگباری محسوب می‌شوند. از این‌رو بررسی رفتار و تغییرات رسوب معلق طی رگبار و در قالب حلقه‌های سنج رسوبی از اهمیت ویژه‌ای در برنامه‌ریزی‌های مدیریتی برخوردار می‌باشد. بر همین اساس پژوهش حاضر با هدف تحلیل رسوب‌نمود و حلقه‌های سنج رسوبی رگبارهای پیاپی در شرایط شبیه‌ساز باران و پلات آزمایشگاهی در یک نوع خاک تهیه‌شده از منطقه کجور در استان مازندران برنامه‌ریزی شد. به این منظور شبیه‌سازی آزمایش‌ها در پلات‌های  $1 \times 6$  متر در شیب ۵ درصد و در شدت‌های بارندگی ۳۰ و ۹۰ میلی‌متر بر ساعت طی شش رگبار پیاپی به‌وسیله شبیه‌ساز باران مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بیان‌گر افزایش عمق رواناب کل با افزایش تعداد رگبارهای پیاپی در شدت بارندگی ۳۰ میلی‌متر بر ساعت از  $8/78$  میلی‌متر در رگبار اول به  $15/05$  میلی‌متر در رگبار ششم و در شدت بارندگی ۹۰ میلی‌متر بر ساعت از  $9/28$  میلی‌متر در رگبار اول به  $11/03$  در رگبار ششم بود. اما هدررفت خاک رفتار پیچیده‌تری نسبت به عمق رواناب داشت به‌نحوی که یک کاهش ناگهانی در هدررفت خاک در توالی چهارم بر خلاف بقیه توالی‌ها رخ داد. در نهایت نتایج حاصل از حلقه‌های سنج رسوبی در رگبارهای پیاپی تحت شدت بارندگی ۳۰ و ۹۰ میلی‌متر بر ساعت نشان‌دهنده تنوع رفتاری رسوب خروجی در مقایسه با تغییرات دبی در قالب شکل‌های مختلف حلقه‌های سنج شامل ساعت‌گرد، پاد ساعت‌گرد و نیز مرکب بود.

**واژه‌های کلیدی:** فرسایش بین‌شیاری، آب‌نمود، رسوب‌نمود، تغییرات زمانی، رگبار

### مقدمه

فرسایش خاک یکی از مهم‌ترین مسائل محیط زیستی و خطرآفرین در منابع طبیعی (خاک و آب) است. آمار و ارقام موجود در مورد میزان فرسایش و رسوب و خسارات ناشی از آن (تخریب و کاهش حاصلخیزی خاک، کاهش ظرفیت آبراهه‌ها و مخازن و آلوده شدن محیط زیست) در سطح جهانی و در ایران هشدار جدی در رابطه با پدیده فرسایش خاک را تأیید نموده است. از این‌رو تشخیص، تعیین، پیش‌بینی و همانندسازی این فرآیند طبیعی در شرایط مختلف می‌تواند راهگشا و راهنمای مدیریت و برنامه‌ریزی حفاظت خاک باشد (Kiani Harchegani *et al.*, 2017). از آنجایی که رسوب به‌عنوان نتیجه نهایی فرآیند فرسایش خاک و یکی از اجزاء اصلی در عملکرد هیدرولوژیکی و محیط زیستی رواناب محسوب می‌شود و دارای تغییرات پیچیده‌ی زمانی و مکانی در مقیاس رگبار است لذا بررسی

تغییرات بار رسوب در مقیاس‌های مختلف زمانی و مکانی به‌عنوان یک ضرورت محسوب می‌شود و می‌تواند به‌عنوان شاخصی برای ارزیابی و درک وضعیت حاکم بر سیستم مورد استفاده قرار گیرد.

در چند دهه اخیر تهیه اطلاعات تفصیلی و درک صحیح سامانه‌های آبخیز و نیز شرایط حاکم بر چرخه هیدرولوژی از ضرورت‌های اجتناب‌ناپذیر برای مدیریت جامع و همه‌جانبه حوزه‌های آبخیز محسوب می‌شود. در این میان انجام مطالعات در مقیاس‌های مختلف زمانی و مکانی و تحلیل دقیق اجزای مختلف فرآیندهای تولید رسوب مورد توجه محققان و مدیران در حوزه‌های آبخیز قرار گرفته است. به‌طوری که ضرورت آگاهی از میزان بار رسوب انتقالی و تغییرات زمانی و مکانی آن منجر به انجام مطالعات گسترده‌ای در این زمینه شد (Saeidi and Sadeghi, 2010). در همین راستا محققان زیادی الگوی تغییرات رسوب معلق در طول وقایع هیدرولوژیکی و به‌خصوص وقایع رگباری در شرایط مختلف را مورد بررسی قرار دادند

\* نویسنده مسئول: m.kiani@modares.ac.ir

مختلف در مقیاس حوزه آبخیز برای درک و فهم بیشتر فرآیندهای فرسایش و رسوب و با توجه به شرایط بسیار پیچیده طبیعی حاکم بر حوضه نیاز به ساده‌سازی و کنترل برخی شرایط و در نظر گرفتن برخی متغیرها و بررسی تأثیر آن‌ها بر رفتار پدیده‌های مذکور ضروری به نظر می‌رسد. لذا با توجه به دشواری‌های فراوان و هزینه نمونه‌برداری دبی و رسوب ناشی از رگبار در مقیاس حوزه آبخیز، انجام آزمایش‌های شبیه‌سازی شده در آزمایشگاه و با استفاده از سامانه شبیه‌ساز باران<sup>۸</sup> و در مقیاس پلات آزمایشگاهی به‌عنوان یکی از بنیادی‌ترین وسایل مورد نیاز برای تحقیقات و مطالعات اجزای مختلف فرآیند فرسایش خاک (Parsons and Lascelles, 2000) توصیه می‌شود. مهم‌ترین مزایای استفاده از شبیه‌ساز باران، سرعت عمل، کارایی، قابلیت کنترل و انعطاف‌پذیری بیشتر آن نسبت به باران‌های طبیعی است (Meyer, 1994). بر همین اساس این پژوهش با هدف تحلیل حلقه‌های سنجه رسوبی وقایع رگبار پیاپی در شرایط شبیه‌ساز باران و پلات آزمایشگاهی در یک نوع خاک تهیه شده از منطقه کجور در استان مازندران در شیب ۵ درصد و در شدت‌های بارندگی ۳۰ و ۹۰ میلی‌متر بر ساعت طی ۶ رگبار پیاپی در فرسایش بین‌شیاری مورد بررسی قرار گرفت.

## مواد و روش‌ها

### - شبیه‌سازی باران و فرسایش خاک

کلیه شبیه‌سازی باران‌ها روی پلات‌های متوسط آزمایشگاهی با طول و عرض به ترتیب ۶ و ۱ متر و در سه تکرار در آزمایشگاه شبیه‌ساز باران و فرسایش خاک دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تربیت مدرس انجام شد (شکل ۱).

در مرحله آماده‌سازی پلات‌ها از ۲۰ سانتی‌متر لایه سطحی منطقه، خاک مورد نظر تهیه و به محل آزمایشگاه منتقل شد. نمونه خاک برداشت شده از منطقه‌ای واقع در مراتع ییلاقی 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. برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در آزمایش‌ها مانند درصد ماسه، سیلت 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 ۳۱ درصد، ۵۵ درصد و ۱۴ درصد، ۱/۴۶ گرم بر

Rovira, and Batalla, 2006; Sadeghi *et al.*, 2008 a and b; ) Nadal-Romero *et al.*, 2008; Sadeghi *et al.*, 2009; Sadeghi and Saeidi, 2010; Mostafazadeh *et al.*, 2015; Sun *et al.*, 2016) که نتایج آن‌ها بیان‌گر تغییرات شدید رابطه بین دبی و غلظت رسوب تحت تأثیر عوامل متعدد می‌باشد. لذا رسوب‌نمودها<sup>۱</sup> یا منحنی‌های رسوب که نمایان‌گر توزیع زمانی یا تغییرات غلظت رسوب در طول وقایع هیدرولوژیکی می‌باشند به‌عنوان ابزار مهمی در تحلیل رفتار رسوب با تغییرات دبی (Sadeghi and Singh, 2005; Saeidi and Sadeghi, 2010) و حلقه‌های سنجه رسوب<sup>۲</sup> که مبتنی بر ارتباط دقیق و تغییرپذیری درونی و بین رگباری وقایع موردبررسی می‌باشند، به‌عنوان ابزار مناسبی برای درک نقش کنترل‌کنندگی دبی در تولید رسوب (Mostafazadeh *et al.*, 2015) در پژوهش‌های مختلف در مقیاس حوزه آبخیز مورد استفاده قرار گرفته است. حلقه‌های سنجه رسوب بر اساس ارتباط غلظت رسوب با مقدار دبی شامل شکل‌های مختلف از جمله حالت خطی تک ارزشی<sup>۳</sup> (برای یک مقدار مشخصی از دبی، مقدار غلظت رسوب در منحنی آب‌نمود برابر است)، ساعت‌گرد<sup>۴</sup> (طی یک رگبار وقوع اوج رسوب‌نمود قبل از اوج آب‌نمود باشد)، پاد ساعت‌گرد<sup>۵</sup> (طی یک رگبار وقوع اوج رسوب‌نمود بعد از اوج آب‌نمود باشد)، حالت خط-حلقه<sup>۶</sup> (ترکیبی از حالت خطی با ساعت‌گرد یا پاد ساعت‌گرد می‌باشد) و هشت شکل<sup>۷</sup> (ابتدا حالت پاد ساعت‌گرد و سپس ساعت‌گرد به‌دلیل موجودیت و تأمین رسوب و در نتیجه افزایش غلظت رسوب طی رگبار رخ می‌دهد) طبقه‌بندی می‌شوند (Williams, 1989). تحلیل شکل‌های مختلف حلقه‌های سنجه در مقیاس حوزه آبخیز با توجه به تغییر در زمان وقوع اوج آب‌نمود، رسوب‌نمود و نیز عوامل مؤثر بر تغییرات رسوب‌نمودها و همچنین با توجه محل تأمین منابع رسوبی که یا در نزدیک خروجی حوضه و یا ناشی از سطح حوضه هستند انواع شکل‌های حلقه‌های سنجه را به‌دنبال داشته و منجر به افزایش دقت مطالعات رسوب‌نمودها و درک بیشتر فرآیندهای هیدرولوژیکی در حوزه‌های آبخیز می‌شود (Gholami *et al.*, 2012; Mostafazadeh *et al.*, 2015; Saeidi *et al.*, 2016).

بررسی سوابق پژوهش موجود نشان می‌دهد که با وجود مطالعه رفتار و تغییرات حلقه‌های سنجه رسوب در شرایط

1. Sedimentgraphs
2. Rating Loops
3. Single-Valued Line
4. Clockwise
5. Anti-Clockwise
6. Single Line Plus a Loop
7. Figure Eight

8. Rainfall Simulator

از نمودارهای شدت، مدت و فراوانی تهیه شده در ایستگاه باران‌نگاری کجور برای منطقه با دوره برگشت ۲۵ تا ۳۰ سال انتخاب شدند. بنابراین شش رگبار پیاپی با فاصله زمانی ۵ روز نسبت به یکدیگر برای رسیدن به رطوبت پیشین خاک (Mahdavi, 2002) با توجه به شیب ۵ درصد در دو شدت انتخابی اجرا شد. همچنین آزمایش‌های شبیه‌سازی باران در شرایط رطوبتی خاک متناسب با شرایط عمومی حاکم بر منطقه قبل از وقوع بارندگی و با اندازه‌گیری رطوبت حجمی در منطقه و آزمایشگاه به روش توزین نمونه تر و خشک و حفظ شرایط نسبتاً مشابه در آزمایش‌های پیش‌بینی شده انجام شد. در این آزمایش‌ها از آب چاه با pH برابر با 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.

#### - اندازه‌گیری توان باران و رواناب

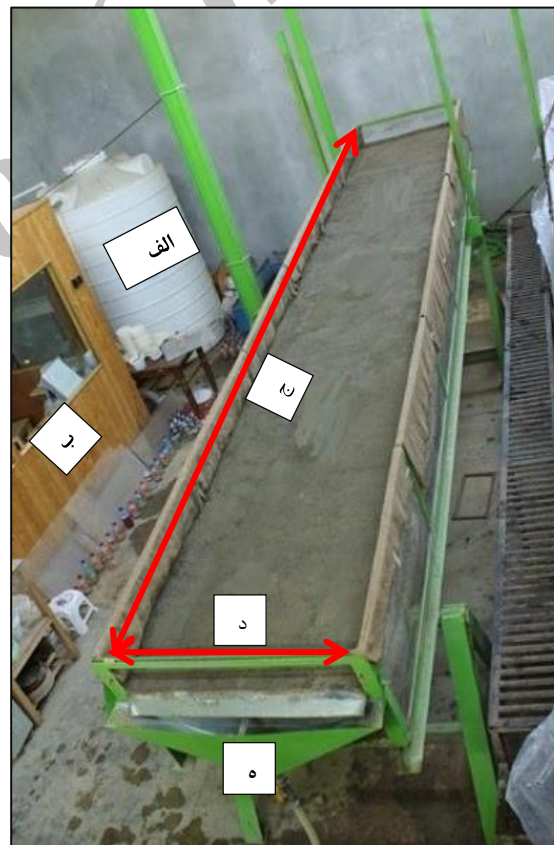
برای اندازه‌گیری توان باران و رواناب تحت شرایط آزمایشگاهی شبیه‌سازی شده از روابط موجود (Gabet and Dunne, 2003; Wang et al., 2014) استفاده شد:

$$R = \frac{\rho I v^2 \cos \theta}{2} \quad (\text{رابطه ۱})$$

$$\omega = \rho g S Q / W \quad (\text{رابطه ۲})$$

که در آن‌ها  $R$  و  $\omega$  بیان‌گر توان باران و جریان برحسب وات بر مترمربع،  $\rho$  چگالی آب برابر ۱۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب تا ۲۵ درجه سانتی‌گراد،  $I$  شدت باران برحسب متر بر ثانیه و  $v$  سرعت قطرات باران برحسب متر بر ثانیه و  $\theta$  درجه شیب شتاب ثقل (برابر با ۹/۸ متر بر مجذور ثانیه)،  $S$  سینوس شیب پلات،  $Q$  دبی برحسب مترمکعب بر ثانیه و  $W$  عرض جریان برحسب متر می‌باشد. در همین راستا میانگین توان باران در شیب‌های ۳ درجه و برای شدت‌های بارش ۳۰ و ۹۰ میلی‌متر بر ساعت با میانگین اندازه قطرات باران به ترتیب ۱/۵ و ۱/۵۸ میلی‌متر و همچنین سرعت متناظر ۶/۸۶ و ۶/۶۷ متر بر ثانیه (Kiani Harchegani et al., 2018; Kiani Harchegani and Sadeghi, 2017c) به ترتیب ۰/۱۹ و ۰/۵۴ وات بر مترمربع به دست آمد و میانگین توان رواناب نیز به ترتیب ۰/۱۷ و ۰/۴۷ وات بر مترمربع به دست آمد. همچنین تلاش لازم برای حذف اثر رطوبت پیشین از طریق اندازه‌گیری مکرر رطوبت حجمی خاک قبل از آزمایش‌ها و تا حصول شرایط نسبتاً مشابه صورت گرفت. در ادامه و قبل از شروع آزمایش‌ها، نمونه‌های خاک برای رسیدن به رطوبت طبیعی منطقه در زمان

سانتی‌متر مکعب، ۷/۶۵، ۷/۶۴ میلی‌زیمنس بر متر، ۲/۶۱ درصد و  $12 \pm 3$  درصد به دست آمد. بر اساس اندازه‌گیری‌های انجام پذیرفته، خاک منطقه با ماده آلی نسبتاً بالا، در رده خاک‌های با مرغوبیت بالا با رنگ خاکستری تیره، تهویه و ظرفیت نگهداری آب خاک مناسب ارزیابی شد. سپس نمونه خاک، هوا خشک و سنگ‌ریزه و بقایای گیاهی برای ساده‌سازی شرایط پیچیده طبیعی و امکان مطالعه جامع در زمان و شرایط محدود، حذف از الک ۸ میلی‌متری عبور داده و به خوبی مخلوط شد. قبل از انتقال خاک به درون پلات، لایه زهکشی از جنس پوکه معدنی به صورت تغییر تدریجی اندازه ذرات از بادامی تا ریزدانه به ضخامت ۲۰ سانتی‌متر در کف پلات تعبیه شد (Kiani Harchegani et al., 2018).



شکل ۱. تصویری از داخل شبیه‌ساز باران و فرسایش خاک: الف) مخزن تأمین آب باران، ب) اتاق کنترل، ج) طول پلات (۶ متر)، د) عرض پلات (۱ متر) و ه) سرریز (محل خروج رواناب و رسوب)

پژوهش حاضر در شیب ۵ درصد با توجه به درصد مساحت طبقات شیب به دست آمده و با کاربری کشاورزی در منطقه مادری خاک مورد استفاده انجام پذیرفت. همچنین شدت بارندگی ۳۰ و ۹۰ میلی‌متر بر ساعت با دوام‌های به ترتیب ۳۰ و ۱۰ دقیقه متناسب با هر یک از شدت‌های مزبور با استفاده

نمونه‌برداری، با یک بارش غیر فرساینده با شدت ۵ میلی‌متر بر ساعت مرطوب شدند (Kiani Harchegani et al., 2018).

### اندازه‌گیری داده‌ها

زمان ظهور اولین نشانه‌های رواناب در خروجی هر پلات به‌عنوان مراحل اولیه تولید رواناب و اثر مشترک بارندگی و جریان (جدایش ذرات خاک توسط قطرات باران و انتقال آن‌ها توسط جریان ناشی از اثر قطرات باران (RD-RIFT)<sup>۱</sup> یا جدایش ذرات خاک توسط قطرات باران و انتقال آن‌ها توسط جریان رواناب (RD-FT)<sup>۲</sup>) در ایجاد فرسایش بین‌شیاری (Kinnell, 2005 and 2009) و انتقال رسوبات با استفاده از زمان سنج ثبت و سپس حجم رواناب در فواصل زمانی یک‌دقیقه‌ای اندازه‌گیری شد. در همین راستا نمونه‌های آب و رسوب از خروجی پلات در هر واقعه باران با توجه به شیب و شدت‌های بارندگی مورد استفاده، 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 نمودن رسوب در دمای ۱۰۵ درجه آون مشخص شد (Sadeghi and Saeidi, 2010; Sadeghi and Kiani, 2012).

### تحلیل حلقه‌های سنج رسوبی

داده‌های حاصل از دبی رواناب یا جریان و غلظت رسوب در فرسایش بین‌شیاری در شش رگبار پیاپی در شیب ۵ درصد و شدت‌های بارندگی ۳۰ و ۹۰ میلی‌متر بر ساعت در Excel 2010 دسته‌بندی و بانک اطلاعاتی داده‌ها تهیه شد در نهایت آب‌نمود، رسوب‌نمود و حلقه‌های سنج رسوبی تهیه و تحلیل حلقه‌های رسوبی صورت پذیرفت.

### نتایج و بحث

#### تحلیل تغییرات مقادیر رواناب و هدررفت خاک طی شش رگبار پیاپی

نتایج مربوط به مقادیر کل رواناب و هدررفت کل خاک حاصل از شش رگبار پیاپی در شیب ۵ درصد و شدت‌های بارندگی ۳۰ و ۹۰ میلی‌متر بر ساعت مورد استفاده برای تحلیل حلقه‌های سنج رسوب در جدول (۱) ارائه شده است. نتایج نشان داد که با افزایش توالی رگبارها مقدار کل رواناب هر واقعه افزایش یافته به‌نحوی که مقدار کل رواناب روند صعودی دارد. اما هدررفت

خاک رفتار پیچیده‌تری داشت به‌طوری‌که در هر دو شدت بارندگی ۳۰ و ۹۰ میلی‌متر بر ساعت در واقعه بارندگی چهارم با وجود افزایش مقدار کل رواناب، هدررفت کل خاک کاهش پیدا کرده و مجدد در وقایع پنجم و ششم افزایش هدررفت خاک مشاهده شد. در همین راستا نتایج حاصل از مقایسه هدررفت کل خاک و مقدار کل رواناب طی شش رگبار پیاپی در دو شدت بارندگی ۳۰ و ۹۰ میلی‌متر بر ساعت بیان‌گر ۱/۲۴ برابری مقدار کل رواناب در شدت بارندگی ۳۰ نسبت به ۹۰ میلی‌متر بر ساعت می‌باشد؛ هم‌چنین هدررفت خاک نیز افزایش ۰/۸۷ برابری در شدت بارندگی ۳۰ نسبت به ۹۰ میلی‌متر بر ساعت طی شش رگبار پیاپی را نشان می‌دهد. کم‌ترین مقدار هدررفت خاک در توالی چهارم برای شدت بارندگی ۳۰ و ۹۰ میلی‌متر بر ساعت به‌ترتیب برابر ۱۱۴/۵۷ و ۶۳۳/۵۲ گرم بر مترمربع بر ساعت و بیش‌ترین مقدار عمق رواناب و هدررفت کل خاک در شدت بارندگی ۳۰ میلی‌متر بر ساعت در توالی ششم به‌ترتیب با مقدار ۱۵/۰۵ میلی‌متر و ۲۹۷/۱۹ گرم بر مترمربع بر ساعت و در شدت ۹۰ میلی‌متر بر ساعت در توالی پنجم به‌ترتیب با مقادیر ۱۲/۵۳ میلی‌متر و ۲۵۸/۳۳ گرم بر مترمربع بر ساعت مشاهده شد.

مقایسه عمق رواناب در شش رگبار پیاپی در دو شدت بارندگی ۳۰ و ۹۰ میلی‌متر بر ساعت نشان‌دهنده عمق کم‌تر رواناب در باران با شدت ۹۰ میلی‌متر بر ساعت نسبت به باران با شدت ۳۰ میلی‌متر بر ساعت می‌باشد که می‌تواند ناشی از توان بالای باران و رواناب در شدت بارندگی ۹۰ نسبت به ۳۰ میلی‌متر بر ساعت باشد و به‌دلیل توان بالای باران و رواناب در شدت بارندگی ۹۰ میلی‌متر بر ساعت در ایجاد فرسایش و انتقال رسوبات هدررفت خاک در شدت بارندگی ۹۰ نسبت به ۳۰ میلی‌متر بر ساعت افزایش نشان می‌دهد. چون توانایی جدایش ذرات خاک بیش‌تر و ایجاد ضریب زبری بیش‌تر در سطح پلات و در نتیجه کاهش ضریب رواناب را به دنبال داشت. لذا مقدار نفوذ در شدت باران ۹۰ میلی‌متر بر ساعت نسبت به ۳۰ میلی‌متر بر ساعت بیش‌تر بوده و مقدار رواناب کم‌تری مشاهده شد.

دقت در نتایج جدول هم‌چنین بیان‌گر ضریب تغییرات ۸/۳۴ و ۹/۱۷ برای مقدار کل رواناب و ۵۰/۴۱ و ۵۲/۴۶ برای هدررفت کل در شش رگبار پیاپی به وقوع پیوسته به‌ترتیب در شدت بارندگی ۳۰ و ۹۰ میلی‌متر بر ساعت است. دلیل این امر را می‌توان ناشی از فرآیند انتخابی حاکم بر فرآیند فرسایش بین‌شیاری و طبعاً انتقال ذرات رسوبی با اندازه‌های متفاوت و ایجاد تغییر در وزن رسوب انتقالی دانست. به‌طوری‌که رسوب‌های با اندازه کوچک‌تر در شدت‌های بارندگی ۳۰ و ۹۰

1. Raindrop Detachment with Transport by Raindrop-Induced Flow Transport  
2. Raindrop Detachment with Transport by Flow

هدررفت خاک شده‌اند که با نتایج Kiani Harchegani *et al* (2017a) مبنی بر تعیین دامنه ضریب تغییرات مقادیر عمق رواناب و هدررفت خاک در شرایط شبیه ساز باران و فرسایش خاک هم‌خوانی دارد.

میلی‌متر بر ساعت طی فرآیند فرسایش به دلیل نیاز به توان کم باران و رواناب منتقل شده و ذرات بزرگ‌تر در شدت بارندگی‌های مذکور مخصوصاً در توالی‌های آخر به سرریز پلات رسیده و منجر به ایجاد تغییرات بیش‌تر در ضریب تغییرات

جدول ۱. نتایج مقادیر عمق رواناب و هدررفت خاک حاصل از شش رگبار پیاپی در شیب ۵ درصد و شدت‌های بارندگی ۳۰ و ۹۰ میلی‌متر بر ساعت

۹۰		۳۰		شدت بارندگی (میلی‌متر بر ساعت)
هدررفت خاک (گرم بر مترمربع بر ساعت)	عمق رواناب (میلی‌متر)	هدررفت خاک (گرم بر مترمربع بر ساعت)	عمق رواناب (میلی‌متر)	رگبارهای پیاپی
۲۲۶/۶۲	۹/۲۸	۹۷/۳۷	۸/۷۸	۱
۲۰۴/۵۶	۹/۸۰	۱۱۴/۹۹	۱۳/۰۶	۲
۶۹۷/۶۷	۱۱/۵۳	۱۳۷/۵۱	۱۴/۰۴	۳
۶۳۳/۵۲	۱۱/۷۳	۱۱۴/۵۷	۱۴/۷۴	۴
۲۵۸/۳۳	۱۲/۵۳	۱۵۰/۱۶	۱۵/۰۴	۵
۲۲۲/۰۲	۱۱/۰۳	۲۹۷/۱۹	۱۵/۰۵	۶
۱۷۳/۸۱	۱۰/۹۹	۱۵۱/۹۷	۱۳/۴۷	میانگین
۵۲/۴۶	۹/۱۷	۵۰/۴۱	۸/۳۴	ضریب تغییرات (درصد)

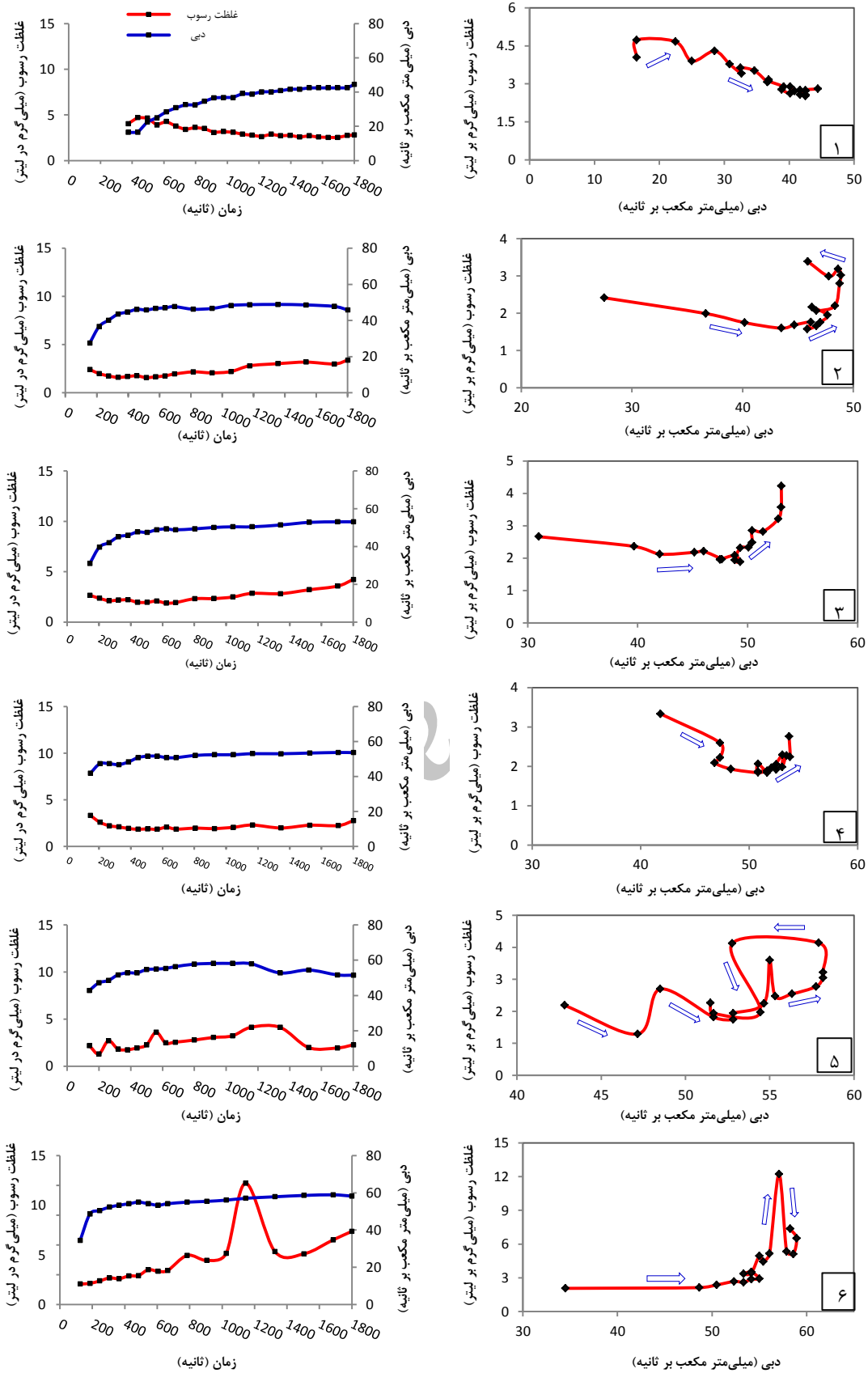
افزایشی داشته، بنابراین دلیل وقوع اوج تأخیری رسوب‌نمود را می‌توان به تأثیر تداوم بارندگی در انتقال رسوب تولیدی طی فرآیندهای مختلف فرسایش نسبت داد. این در حالی است که بر اساس نتایج ارائه شده در جدول (۱)، مقادیر هدررفت خاک در این دو رگبار برای شدت بارندگی ۹۰ میلی‌متر بر ساعت در مقایسه با رگبار اول کاهش یافته که تأکیدی بر عدم موجودیت رسوب تحت تأثیر تخلیه رسوب تولیدی طی وقایع رگبار قبلی و افزایش توان رواناب در انتقال رسوب به خروجی پلات بود. نتایج حاصل با یافته‌های Walling and Webb (1982), Saeidi and Sadeghi (2010), Mostafazadeh *et al* (2015) مبنی بر نقش کنترل‌کنندگی موجودیت رسوب بر شکل رسوب‌نمود مطابقت دارد. نتایج هم‌چنان بر نقش رگبارهای پیاپی در کاهش مقادیر وزن کل رسوب حمل شده توسط رگبار دلالت داشته که با یافته‌های Nadal-Romero *et al* (2008), Sadeghi *et al* (2008a), Mostafazadeh *et al* (2015), Saeidi and Sadeghi (2010)، مطابقت دارد.

تحلیل آب‌نمود، رسوب‌نمود و حلقه سنجه رسوبی حاصل از رگبارهای پیاپی چهارم و ششم در شدت بارندگی ۳۰ میلی‌متر بر ساعت نیز نشان‌دهنده تفاوت عملکرد رسوب خروجی از پلات در تشکیل شکل‌های مختلف حلقه سنجه

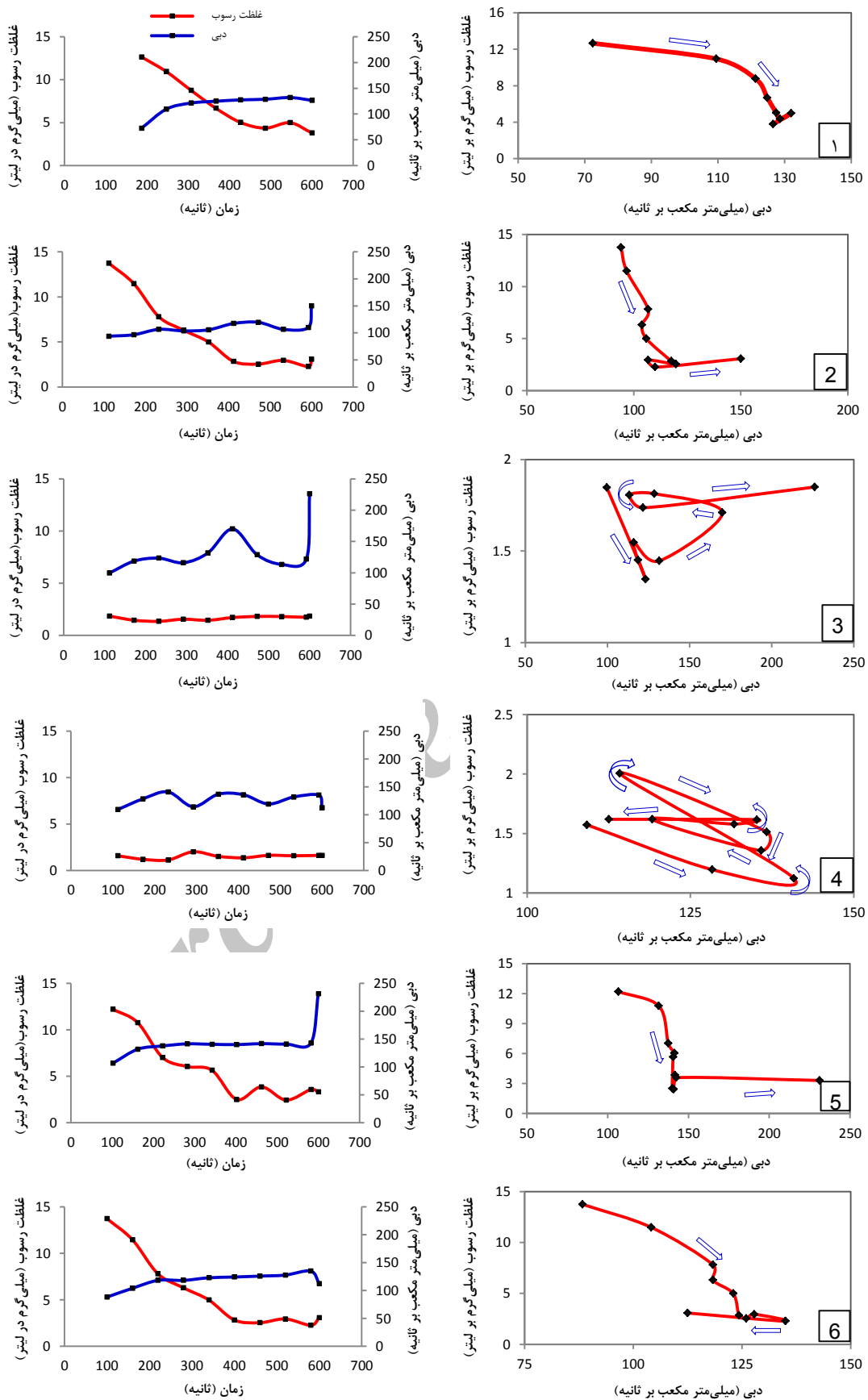
تحلیل آب‌نمود، رسوب‌نمود و حلقه سنجه رسوبی طی شش رگبار پیاپی

نتایج حاصل از تحلیل آب‌نمود، رسوب‌نمود و حلقه‌های سنجه رسوبی شش رگبار پیاپی در شیب ۵ درصد و شدت بارندگی ۳۰ و ۹۰ میلی‌متر بر ساعت به ترتیب در شکل (۲) و (۳) ارائه شده است. دقت در نتایج مربوط به حلقه‌های سنجه رسوبی ارائه شده در شش رگبار پیاپی در شدت بارندگی ۳۰ و ۹۰ میلی‌متر بر ساعت (شکل ۲ و ۳) نشان‌دهنده تنوع رفتاری رسوب خروجی در مقایسه با تغییرات دبی در قالب شکل‌های مختلف حلقه‌های سنجه شامل ساعت‌گرد، پاد ساعت‌گرد و نیز مرکب بود. در این راستا، در اولین رگبار از سری رگبارهای پیاپی برای هر دو شدت بارندگی ۳۰ و ۹۰ میلی‌متر بر ساعت، الگوی حلقه سنجه ساعت‌گرد و تخلیه سریع رسوب نسبت به رواناب مشاهده شد که نشان‌دهنده تأثیر فرآیند پاشمان در تأمین رسوب قابل انتقال در طول پلات بود.

بررسی الگوی رسوب‌نمود برای دو رگبار دوم و سوم در شدت بارندگی ۳۰ میلی‌متر بر ساعت نیز دلالت بر وقوع اوج تأخیری رسوب‌نمود در مقایسه با آب‌نمود و نیز تشکیل حلقه سنجه پادساعت‌گرد داشت. اگر چه بر اساس نتایج حاصل از جدول (۱)، برای این دو رگبار در شدت مذکور در مقایسه با شدت ۹۰ میلی‌متر بر ساعت مقادیر هدررفت خاک روند



شکل ۲. آب‌نمود و رسوب‌نمود و حلقه‌های سنج رسوبی شش رگبار پیاپی در شیب ۵ درصد و شدت ۳۰ میلی‌متر بر ساعت



شکل ۳. آب نمود و رسوب نمود و حلقه های سنجه رسوبی شش رگبار پیاپی در شیب ۵ درصد و شدت ۹۰ میلی متر بر ساعت

نقش الگوی بارندگی و نیز تعامل پیچیده بین سامانه‌های بارشی در پاسخ رسوبی سامانه مطابقت دارد. این عکس‌العمل متفاوت رسوب نیز در رگبارهای پیاپی پنجم و ششم در قالب رفتار متفاوت حلقه‌های سنجه رسوبی و رسوب‌نمود نیز قابل مشاهده بود. به‌نحوی که در رگبار پنجم علی‌رغم افزایش مقادیر هدررفت خاک و نیز وقوع اوج زودرس رسوب‌نمود الگوی حلقه سنجه به‌صورت پادساعت‌گرد مشاهده شد. دلیل این امر را می‌توان به نقش مؤثرتر توان باران در انتقال ذرات ریزتر به خروجی در مقایسه با رواناب نسبت داد که با یافته‌های Kiani Harchegani et al (2017c) مبنی بر تأثیرپذیری بیشتر رفتار رسوب از بارندگی در مقایسه با رواناب در مقیاس پلات مطابقت دارد. این در حالی است که رگبار ششم نشان‌دهنده کاهش مقادیر رواناب و هدررفت رسوب و نیز وقوع اوج زودرس با الگوی سنجه ساعت‌گرد بود. به‌طور کلی تحلیل نتایج حاصل از آب‌نمود، رسوب‌نمود و حلقه‌های سنجه مشاهداتی از شش توالی بارندگی برای دو شدت ۳۰ و ۹۰ میلی‌متر بر ساعت در شیب ۵ درصد و در مقیاس پلات نشان‌دهنده رفتار متنوع و بسیار پیچیده رسوب خروجی داشته و به نوعی بر تأثیرگذاری سایر عوامل از جمله توان و تواتر بارندگی، توان رواناب و توزیع اندازه ذرات رسوب موجود، اتصال‌های رسوبی و میزان مشارکت انواع مختلف فرسایش در بروز رفتار متفاوت رسوب خروجی از پلات تأکید داشت.

#### نتیجه‌گیری

تحلیل سنجه‌های رسوب می‌تواند در دستیابی به نتایج قابل‌اعتماد برای مدیریت بهتر و مناسب‌تر آب و خاک مخصوصاً متناسب با مقیاس‌های زمانی تأثیر بسزایی داشته باشد. در همین راستا تحلیل حلقه‌های سنجه رسوب و تغییرات آن‌ها در دو شدت بارندگی مختلف ۳۰ و ۹۰ میلی‌متر بر ساعت در آزمایشگاه شبیه‌ساز باران و فرسایش خاک در پلات ۱×۶ متر و بر روی یک نمونه خاک در شش رگبار پیاپی انجام پذیرفت. نتایج حاصل از مقایسه هدررفت کل خاک و مقدار کل رواناب طی شش رگبار پیاپی در دو شدت بارندگی ۳۰ با ۹۰ میلی‌متر بر ساعت بیان‌گر افزایش ۱/۲۴ برابری مقدار کل رواناب و افزایش ۰/۸۷ برابری هدررفت خاک در شدت بارندگی ۳۰ نسبت به ۹۰ میلی‌متر بر ساعت بود. نتایج نشان‌دهنده تنوع رفتاری رسوب خروجی در مقایسه با تغییرات دبی در قالب شکل‌های مختلف حلقه‌های سنجه شامل ساعت‌گرد، پاد ساعت‌گرد و نیز مرکب بود که این تفاوت در رفتارهای هیدرولوژیکی رسوب طی رگبارهای پیاپی مخصوصاً از نظر تولید

رسوبی بود. به‌نحوی که بررسی تغییرات لحظه‌ای رسوب در رگبار پیاپی چهارم نیز نشان‌دهنده شکل‌گیری الگوی سنجه پادساعت‌گرد علی‌رغم وقوع اوج زودرس رسوب‌نمود بود. از طرفی بررسی نتایج حاصل از مقادیر هدررفت خاک (جدول ۱) نشان‌دهنده کاهش مقادیر رسوب علی‌رغم افزایش عمق رواناب در رگبار چهارم داشت. دلیل این امر را می‌توان به نقش وقایع بارندگی قبلی در انتقال ذرات رسوب ریزدانه‌تر و باقی ماندن ذرات درشت‌تر و در نتیجه تأثیر افزایش وزن رسوب خروجی از پلات تحت تأثیر افزایش اندازه ذرات رسوبی نسبت داد که با یافته‌های Walling et al (2000) در این‌باره هم‌سو بود. از طرفی این تفاوت رفتاری در رگبار پیاپی ششم در قالب تشکیل حلقه سنجه ساعت‌گرد علی‌رغم اوج تأخیری رسوب‌نمود نشان داده شد. اگر چه نتایج جدول (۱) دلالت بر افزایش مقادیر رسوب علی‌رغم کاهش عمق رواناب خروجی از پلات در رگبار ششم داشته که دلیل این امر را می‌توان به ریزش احتمالی رسوبات درشت‌دانه موجود در نزدیکی خروجی پلات تحت تأثیر خروج رواناب و افزایش وزن رسوب ناشی از مشارکت ذرات درشت‌دانه نسبت داد.

افزایش مقادیر رسوب خروجی از پلات برای رگبار پیاپی پنجم در شدت بارندگی ۳۰ میلی‌متر بر ساعت منجر به شکل‌گیری حلقه سنجه مرکب با حلقه پادساعت‌گرد تحت تأثیر مشارکت طبقات مختلف اندازه ذرات رسوبی بود و نیز دلالت بر رفتار پیچیده رسوب تحت تأثیر وقایع پیاپی بارندگی داشته که با یافته‌های Nadal-Romero et al (2008), Sadeghi et al (2010), Mostafazadeh et al (2008a), Saeidi and Sadeghi (2010), در این زمینه مطابقت دارد.

بررسی نتایج حاصل از شکل (۳)، نشان‌دهنده رفتار متفاوت رسوب خروجی در شدت ۹۰ میلی‌متر بر ساعت در مقایسه با شدت ۳۰ میلی‌متر بر ساعت بود. به‌نحوی که در رگبار پیاپی دوم علی‌رغم وقوع زودرس اوج رسوب‌نمود، حلقه سنجه رسوبی پادساعت‌گرد بیان‌کننده تغییرات رسوب در مقابل رواناب بوده و هم‌چنین بر اساس نتایج ارائه‌شده در جدول (۱)، علی‌رغم افزایش میزان رواناب، مقادیر هدررفت خاک نسبت به رگبار اول کاهش یافته است. تحلیل الگوی حلقه سنجه رسوبی در دو رگبار پیاپی سوم و چهارم در شدت مذکور نیز دلالت بر تشکیل حلقه‌های سنجه مرکب داشته که نشان‌دهنده تأثیرپذیری و تنوع رفتار و مشارکت رسوب از عوامل مختلف از جمله توان رواناب، شدت و تواتر بارندگی بود. نتایج حاصل با یافته‌های Rovira, and Batalla, (2006), Saeidi and Sadeghi (2010), Nu-Fang et al (2011), De Girolamo et al (2015) مبنی بر



شیب‌ها و شدت‌های مختلف بارندگی با الگوهای مختلف باران، بافت‌های مختلف خاک و شرایط رطوبتی مختلف خاک در شرایط شبیه‌سازی شده پیشنهاد می‌گردد. همچنین برای جلوگیری از جا به جایی خاک منطقه مادری و صرفه‌جویی در هزینه‌هایی مثل انتقال خاک، پلات‌هایی با مقیاس‌های مختلف و تحت باران طبیعی در عرصه نصب و فرآیندهای فرسایش و رسوب و حلقه‌های سنجه آن‌ها طی رگبارهای پیاپی بررسی شود.

رسوب تحت تأثیر شدت رواناب تولیدی، موجودیت رسوب، توزیع اندازه ذرات رسوب، فرآیندهای اتصال رسوب طی فرآیندهای تکاملی فرسایش قرار دارند. تحلیل فرآیندهای فرسایش و رسوب با استفاده از الگوهای حلقه رسوبی می‌تواند به پژوهشگران در درک و فهم بهتر فرآیندهای مذکور کمک نماید. در همین راستا با توجه به موارد بیان شده برای توسعه و جمع‌بندی نتایج به‌دست آمده در این زمینه پژوهش‌هایی در

## REFERENCES

- De Girolamo, A.M., Pappagallo G. and Porto. A. L. (2015). Temporal variability of suspended sediment transport and rating curves in a Mediterranean river basin: The Celone (SE Italy). *Catena*, 128, 135–143.
- Gabet, E. J., Dunne, T. (2003). Sediment detachment by rain power, *Water Resources Research*, 39(1), ESG-1.
- Gholami, L., Sadeghi, S. H. R. and Khaledi, A. V. (2012). Storm-wise rating loops in Chehelgazi watershed of Gheshlagh dam. *Iranian Water Resource Journal*, 6, 29-36. (In Farsi)
- Kiani Harchegani, M, Sadeghi, S. H. R. and Asadi, H. (2017a). Inter-Storm variability of coefficient of variation of runoff volume and soil loss during rainfall and erosion simulation replicates. *Ecohydrology*, 4(1), 191-199. (In Farsi)
- Kiani Harchegani, M., Sadeghi, S. H. R. and Asadi, H. (2017c); Changeability of concentration and particle size distribution of effective sediment in initial and mature flow generation conditions under different slopes and rainfall intensities. *Iranian Journal of Water Engineering and Management*, 9(2), 205-216(In Farsi)
- Kiani Harchegani, M, Sadeghi, S.H.R. Asadi, H (2018). Comparing grain size distribution of sediment and original soil under raindrop detachment and raindrop-induced and flow transport mechanism, *Hydrological Sciences Journal*, 63 (2), 312-323
- Kinnell, P. I. A. (2005). Raindrop impact induced erosion processes and prediction: A review. *Hydrological Processes*, 19, 2815–2844.
- Kinnell, P. I. A. (2009). The influence of raindrop induced saltation on particle size distributions in sediment discharged by rain-impacted flow on planar surfaces. *Catena*, 78(1), 2-11.
- Mahdavi, M. (2002). Applied Hydrology, Tehran University Press. 2, 437. (In Farsi)
- Meyer, L. D. and Harmon, W. C., (1984). Susceptibility of agricultural soils to interrill erosion. *Soil Science Society of America*, 48, 1152-1157.
- Mostafazadeh, R., Sadeghi S. H. R. and Soddodin, A. (2015). Analysis of Storm-wise Sedimentgraphs and Rating Loops in Galazchai Watershed, West-Azerbaijan. *Soil and Water Conservation Researches*, 21(5), 175-190. (In Farsi)
- Nadal-Romero, E., Latron, J., Marti-Bono, C. and Regues, D. (2008). Temporal distribution of suspended sediment transport in a humid Mediterranean badland area: The Araguascatchment, Central Pyrenees. *Geomorphology*, 97, 3-4. 601-616.
- Nu-Fang, F., Zhi-Hua, S., Lu, L. and Cheng, J. (2011). Rainfall, runoff, and suspended sediment delivery relationships in a small agricultural watershed of the Three Gorges area, *China Geomorphology*, 135, 158–166.
- Saeidi, P; Sadeghi, S. H. R. and Telvari, A. R. (2016). Simulation of sediment graph using hydrograph. *Journal of Watershed Engineering and Management*, 8(1), 28-41.
- Parsons, A. J. and Lascelles, B. (2000); Rainfall simulation in geomorphology. *Earth Surface Processes and Landforms*, 25(7): 679-689.
- Rovira, A. and Batalla, R. (2006). Temporal distribution of suspended sediment transport in a Mediterranean basin: The Lower Tordera (NE SPAIN). *Geomorphology*, 79, 58-71.
- Sadeghi, S. H. R., Kiani Harchegani, M. and Asadi, H. (2017). Variability of particle size distributions of upward/downward splashed materials in different rainfall intensities and slope. *Geoderma*, 290, 100-106.
- Sadeghi, S. H. R., Kiani Harchegani, H Asadi (2016); Splash particle size distribution along the experimental plot under different rainfall intensities and slopes. *Iranian Journal of Water and Soil Researches*, 47 (4), 657-664 (In Farsi)
- Sadeghi, S. H. R. and Kiani Harchegani, M. (2012). Effects of sand mining on suspended sediment particle size distribution in Kojour forest river, Iran. *Journal of Agriculture Science and Technology*, 14, 1637-1646.
- Sadeghi, S. H. R. and Singh, J. K. (2005). Development of a synthetic sedimentgraph using hydrological data. *Journal of Agriculture Science and Technology*, 7, 69-77.
- Sadeghi, S. H. R., Gholami, L., Khaledi, A. V. and Telvari, A. R. (2008a). Analyzing sedimentgraph data in Chehelgazi Watershed upstream Gheshlagh Dam. *Iranian-Water Resource Research*, 4, 3. 47-56. (In Farsi)
- Sadeghi, S. H. R., Mizuyama, T., Miyata, S., Gomi, T., Kosugi, K., Fukushima, T., Mizugaki, S. and Onda, Y. (2008b). Determinant factors of

- sediment graphs and rating loops in a reforested watershed. *Journal of Hydrology*, 356, 271-282.
- Sadeghi, S. H. R., Mizuyama, T., Singh, J. K. and Tofighi, B. (2009). Applicability of instantaneous unit sedimentgraph model in an Iranian large watershed. *International Journal of Ecological Economics and Statistics™*, 13, 9. 30-45.
- Saeidi, P. and Sadeghi, S. H. R. (2010). Analysis of observed sedimentgraphs and rating loops on storm basis in Educational Watershed of Tarbiat Modares University. *Iranian Journal of Water and Soil Conservation*, 17(1), 97-12. (In Persian)
- Sun, L., Yan, M., Cai, Q. and Fang, H. (2016). Suspended sediment dynamics at different time scales in the Loushui River, south-central China. *Catena*, 136, 152-16.
- Walling, D. E. and Webb, B. W. (1982). Sediment availability and the prediction of storm-period sediment yields. *Recent developments in the explanation and prediction of erosion and sediment yield, IAHS Publication*, 137, 327-337.
- Walling, D. E., Owens, Ph. N., Waterfall, B. D., Leeks, G. J. L. and Wass P. D. (2000). The particle size characteristics of fluvial suspended sediment in the Humber and Tweed catchments, UK. *Science of Total Environment*, 251/252, 205-222.
- Wang, L., Shi, Z. H., Wang, J., Fang, N. F., Wu, G. L., Zhang, H. Y. (2014). Rainfall kinetic energy controlling erosion processes and sediment sorting on steep hillslopes: a case study of clay loam soil from the Loess Plateau, China, *Journal of Hydrology*, 512, 168-176.
- Williams, G. P. (1989). Sediment concentration versus water discharge. *Journal of Hydrology*, 111, 89-106.

Archive of SID