

## تحلیل مقایسه‌ای اثر شدت باران و شیب پلات‌های آزمایشگاهی بر مؤلفه‌های فرسایش ناشی از اثر قطره‌های باران (RIIE)

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

۱. دانشجوی دکتری گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی،

دانشگاه تربیت مدرس، مازندران، نور

۲. استاد گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، مازندران، نور

۳. دانشیار گروه علوم خاک، دانشگاه گیلان

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۲/۲۳ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۴/۵/۲۶

### چکیده

جدایش پاشمانی و انتقال ذرات خاک به وسیله اثر قطره‌های باران در خاک سطحی شروع روند فرسایش آبی محسوب می‌شود. این در حالی است که به تحلیل فرایندی و اثر عوامل مختلف روی آن کمتر توجه شده است. به همین منظور پژوهش حاضر با هدف تحلیل مقایسه‌ای اثر شیب و شدت باران بر مؤلفه‌های فرسایش ناشی از اثر قطره‌های باران (RIIE) در خاک لوم رسی شنی در مقیاس آزمایشگاهی برنامه‌ریزی شد. برای این کار، ۸۱ آزمایش شبیه‌سازی بارش در پلات‌های ۶×۱ متر در شیب‌های ۵، ۱۵ و ۲۵ درصد متناسب با شرایط فعلی منطقه و در شدت‌های ۳۰، ۶۰ و ۹۰ میلی‌متر بر ساعت با استفاده از منحنی شدت، مدت و فراوانی منطقه و در سه تکرار با شبیه‌ساز باران و در بالادست و پایین دست فنجان پاشمان مورگان و در سه موقعیت بالادست، وسط و پایین دست پلات‌ها صورت گرفت. طبق نتایج پژوهش حاضر، تأثیرپذیری تمامی متغیرهای مورد بررسی شامل پاشمان بالادست و پایین دست و پاشمان کل و خالص ناشی از شدت بارش و تغییرات مکانی در سطح ۹۹ درصد معنادار بود. تنها تأثیر تغییرات مکانی بر پاشمان خالص معنادار نبود ( $P \geq 0/13$ ). همچنین تحلیل نتایج، بر نبود اثر معنادار شیب بر متغیرها ( $P \geq 0/11$ ) به جز پاشمان خالص ( $P \leq 0/01$ ) دلالت داشته است.

**کلید واژگان:** خاک، شبیه‌ساز باران، عوامل فرسایش، فرسایش بارانی، فرایند فرسایش.

### مقدمه

درون لایه نازکی از جریان به صورت پاشش شعاعی<sup>۵</sup> دور از نقاط اثر و پاشش قطره‌های کوچک فرعی پرتاب شده در مسیر سهمی شکل<sup>۶</sup> دور از مکان برخورد قطره‌های اصلی، برای آثار قطره‌های باران در خاک سطحی بیان شده است (Terry, 1998) که در مرحله اول و دوم فرایند جدایش و در مرحله سوم فرایند انتقال رخ می‌دهد (Kinnell, 2005, 2009, 2012).

روش‌های قدیمی اندازه‌گیری کمی تخریب ناشی از اثر قطره‌های باران و انتقال بر اثر پاشمان با استفاده از فنجان‌های پاشمان (Ellison, 1944; Ekern, 1950; Poesen and Torri, 1988; Salles and Poesen, 1999; Legout *et al.*, 2005) بررسی شده است. سپس، محققان مختلف این مطالعات را در آزمایشگاه و عرصه‌های طبیعی از دیدگاه‌های مختلف بررسی کرده‌اند. تخریب پاشمانی هم با اثر قطره‌های باران و هم درجه شیب مرتبط است (Hairsine and Rose, 1991; Kinnell, 2005; Defersha and Melesse, 2012; Liu *et al.*, 2015).

فرسایش بارانی برآیند انرژی افتادن قطره‌های باران و جریان با همدیگر یا به تنهایی است. در نتیجه فرایند تخریب ناشی از اثر قطره‌های باران، ذرات خاک جدا می‌شود و با یک یا برخی از فرایندهای انتقال مثل پاشمان<sup>۱</sup> (ST) یا لایه نازک جریان ناشی از قطره‌های باران<sup>۲</sup> (RIFT) یا جریان<sup>۳</sup> (FT) از محل اصلی خود دور می‌شود. زمانی که تخریب خاک در نتیجه انرژی قطره‌های باران و در نبود جریان با عمق حفاظتی لازم رخ دهد، فرسایش ناشی از اثر قطره‌های باران<sup>۴</sup> (RIIE) اتفاق می‌افتد که عامل اصلی در فرسایش بین‌شیاری نیز محسوب می‌شود و شامل یک سری فرایندهای پیچیده است. سه مرحله برخورد و تغییر شکل قطره‌های باران در سطح خاک، گسیختگی و فروپاشی قطره‌ها

\* نویسنده مسئول: Sadeghi@modares.ac.ir

1. Transport by raindrop Splash  
2. Raindrop-Induced Flow Transport  
3. Transport by Flow  
4. Raindrop Impact Induced Erosion

5. Spraying Radially  
6. Parabolic Trajectories

مختلف و با قطر قطره‌های باران ۲/۵ تا ۳ میلی‌متر و در شیب‌های ۵ و ۱۵ درصد پرداختند. نتایج مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون دانکن بیانگر افزایش میزان پاشمان با افزایش شیب در سطح احتمال ۱ درصد بوده است.

جمع‌بندی سوابق تحقیق نشان می‌دهد که تاکنون تحقیق جامعی در خصوص بررسی اثر شدت بارش، شیب و تغییرات محل در بالا، وسط و پایین در طول پلات، همچنین آثار متقابل آن‌ها و با تأکید بر فرسایش ناشی از اثر قطره‌های باران (RIIE) گزارش نشده است. لذا، تحقیق حاضر به تحلیل مقایسه‌ای اثر شدت و شیب بر مؤلفه‌های فرسایش ناشی از اثر قطره‌های باران در شرایط آزمایشگاهی و با رعایت حداکثری مهارپذیری شرایط حاکم بر فرسایش خاک و دامنه‌ای گسترده از شدت بارش و شیب پلات پرداخته است.

## مواد و روش‌ها

### تأمین خاک و آماده‌سازی پلات‌ها

پژوهش حاضر روی خاک‌های برداشت‌شده از منطقه‌ای واقع در مراتع ییلاقی دامنه‌های شمالی البرز در حد فاصل جاده کدیر-کجور به ترتیب با طول و عرض جغرافیایی ۴۴° ۵۱' و ۳۶° ۲۴' انجام پذیرفت. در شرایط فعلی منطقه، خیلی از تغییرات کاربری اراضی اختلاط شرایط حاکم بر آن‌ها را به وجود آورده است. لذا، در نظر گرفتن شیب‌های مختلف برای تحلیل شرایط مختلف، به‌ویژه بررسی نقش تغییرات کاربری اراضی و فرایندهای فرسایش اهمیت دارد. بنابراین، برای اجرای آزمایش‌ها سه شیب ۵، ۱۵ و ۲۵ درصد متناسب با اراضی کشاورزی استاندارد، شرایط عمومی و غالب حاکم بر اراضی کشاورزی دیم کشور و عرصه‌های منابع طبیعی انتخاب شد. همچنین، آزمایش‌های شبیه‌سازی باران در شرایط رطوبتی خاک متناسب با شرایط عمومی حاکم بر منطقه و با اندازه‌گیری رطوبت حجمی در منطقه و آزمایشگاه به روش توزین نمونه تر و خشک و حفظ شرایط نسبتاً مشابه در آزمایش‌های پیش‌بینی‌شده با شدت‌های تقریبی ۳۰، ۶۰ و ۹۰ میلی‌متر در ساعت و دوام‌های ۳۰، ۱۵ و ۱۰ دقیقه متناسب با هر یک از شدت‌های مزبور با استفاده از نمودارهای شدت، مدت و فراوانی تهیه‌شده در ایستگاه باران‌نگاری کجور برای منطقه اجرا شد. 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.

بررسی روابط بین تخریب پاشمانی و خصوصیات بارش به مطالعات ۶۰ سال اخیر برمی‌گردد که به‌طور کلی بیان شده است تخریب پاشمانی به‌صورت نمایی یا خطی با شدت بارش یا انرژی جنبشی قطره‌های بارش افزایش می‌یابد (Gerits *et al.*, 1990). در مطالعات اخیر، Valettea *et al.* و همکاران (2006)، Barry و همکاران (2010)، Bhattacharyya و همکاران (2010)، Goebes و همکاران (2014) نیز به ارتباط بین تأثیر خصوصیات بارش مثل شدت، اندازه قطره‌ها و انرژی جنبشی آن‌ها بر میزان هدررفت توجه کرده‌اند. اما ارتباط بین تخریب پاشمانی با درجه شیب به سبب اثر آن بر فرسایش‌پذیری و فرسایش‌پذیری پیچیده بیان شده است (Ben-Hur and Agassi, 1997). در همین راستا، برخی مطالعات به بررسی رابطه بین تخریب پاشمانی و درجه شیب در شرایط آزمایشگاه شبیه‌ساز باران با استفاده از شدت ثابت در خاک‌های کشاورزی پرداختند (Bryan, 1979; Torri and Poesen, 1992; Fan and Wu, 1999). افزایش خطی و غیرخطی و کاهش میزان تخریب پاشمانی با درجه شیب را به ترتیب Foster *et al.* (1977)، Misra and Rose (1995) و Bryan (1979) گزارش کردند. همچنین، تعدادی از مطالعات عرصه‌ای به بررسی رابطه بین تخریب پاشمانی با درجه شیب پرداختند.

Morgan (1978) فرسایش پاشمانی را در نهمصد روز با استفاده از شش فجان پاشمان در شیب ۶ تا ۱۱ درجه اندازه‌گیری کرد، اما هیچ رابطه‌ای بین متوسط تخریب پاشمانی و درجه شیب پیدا نکرد، چون نتایج او از وقایع بارش با شدت‌های بارش مختلف، تکرارهای ناکافی مکانی و دامنه کم درجات شیب تأثیر پذیرفته بود.

Janeau *et al.* (2003) آزمایش‌هایی در شرایط مزرعه انجام دادند و بیان کردند که تخریب پاشمانی با افزایش درجه شیب از ۹ درجه به ۳۲ درجه کاهش یافت. همچنین، Fu *et al.* (2011) به بررسی فرسایش پاشمان در شرایط آزمایشگاهی و در شدت بارش ۶۷ میلی‌متر بر ساعت، در چهار جهت و در شیب‌های مختلف پرداختند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان‌دهنده افزایش مقدار کل پاشمان با افزایش شیب بود که به دلیل افزایش نیروی قطره‌های باران از نیروی چسبندگی ذرات خاک برای جدایش ذرات خاک بیان شد. همچنین، Brodowski (2013) نیز به افزایش معنادار پاشمان با افزایش شیب اشاره داشت.

در ایران نیز Yusefi *et al.* (2014) به بررسی فرسایش پاشمان در شدت بارش ۹۰ میلی‌متر بر ساعت با دوام‌های

### آزمایش‌های شبیه‌سازی باران

در این آزمایش‌ها از آب چاه با pH ۷/۲۷، هدایت الکتریکی ۷۲۷ میکرو زیمنس بر سانتی‌متر، اکسیژن محلول ۳۰/۷ درصد و فسفر فسفات ۰/۱۷ میلی‌گرم در لیتر و نیترات ۴/۴۱ میلی‌گرم در لیتر برای شبیه‌سازی باران استفاده شد (Montenegro *et al.*, 2013). همچنین، برای اندازه‌گیری توان باران و محاسبه اثر شدت‌های مختلف بارش در پاشمان از معادله ۱ استفاده شد (Shi *et al.*, 2013).

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

که در آن  $R$  توان باران بر حسب وات بر مترمربع،  $\rho$  چگالی آب برابر ۱۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب تا ۲۵ درجه سانتی‌گراد،  $I$  شدت باران بر حسب متر بر ثانیه و  $v$  سرعت قطره‌های باران بر حسب متر بر ثانیه و  $\theta$  درجه شیب است. طبق معادله (۱)، میانگین توان باران در شیب‌های ۳، ۹ و ۱۵ درجه و برای شدت‌های بارش ۳۰، ۶۰ و ۹۰ میلی‌متر بر ساعت با میانگین اندازه قطره‌های باران به ترتیب ۱/۵، ۱/۵۷ و ۱/۵۸ میلی‌متر (Abdollahi *et al.*, 2013; Sadeghi *et al.*, 2013) سرعت متناظر ۶/۸۶، ۶/۹۱ و ۶/۶۷ متر بر ثانیه (Khaledi *et al.*, 2014) به ترتیب ۰/۱۹، ۰/۳۹ و ۰/۵۴ وات بر مترمربع به دست آمد.

### اندازه‌گیری هدررفت خاک در RIII

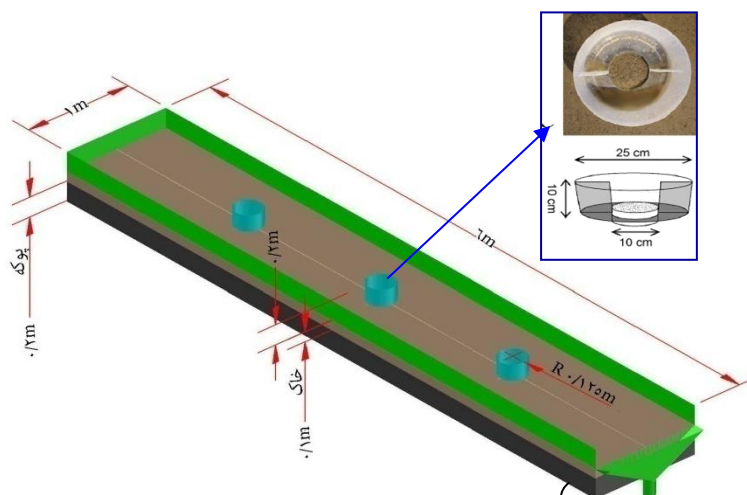
در پژوهش حاضر، برای اندازه‌گیری پاشمان خاک و نمایش شرایط غالب بارندگی در جداکردن و انتقال ذرات از سه فنجان پاشمان با قطر ۰/۲۵ متر و ارتفاع ۰/۱ متر (Khaledi *et al.*, 2014) در بالا، وسط و پایین هر پلات به فاصله ۱/۵ متری از هم و در فاصله ۱/۵، ۳ و ۴/۵ متر از سریز فلوم استفاده شد. برای اندازه‌گیری RIII میانگین مدت زمان اندازه‌گیری پاشمان در سه تکرار در شیب‌ها و شدت‌های مختلف مطابق جدول ۱ از زمان شروع بارش تا زمان جاری شدن رواناب به صورت پایش چشمی طی فرایند تکاملی فرسایش صورت پذیرفت. برای اطمینان از عدم تأثیر RIII از رواناب طی فرایند تکاملی فرسایش، بعد از رسیدن اولین قطره‌ها به سرریز فلوم، دهانه ظروف پاشمان سریع با قطعات ابری از پیش آماده شده پوشانده می‌شد. ذرات خاک پاشمان شده از خاک پلات به درون ظروف پاشمان در بالادست و پایین دست ظرف پاشمان در سه ظرف بالا، وسط و پایین در طول پلات در سه تکرار در سه شیب و در سه شدت در مجموع به تعداد ۸۱ نمونه در بالادست و ۸۱ نمونه در پایین دست به کمک شست‌وشو با آب مقطر به داخل بشر منتقل شد و در آون به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۰۵

کل شبیه‌سازی باران‌ها روی پلات‌های متوسط آزمایشگاهی با طول و عرض به ترتیب ۶ و ۱ متر و در سه تکرار هم‌زمان در آزمایشگاه شبیه‌ساز باران و فرسایش خاک دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تربیت مدرس انجام شد. در مرحله آماده‌سازی پلات‌ها از ۲۰ سانتی‌متر لایه سطحی منطقه، خاک مورد نظر تهیه و به محل آزمایشگاه منتقل شد. سپس، نمونه خاک هواخشک و سنگ‌ریزه و بقایای گیاهی برای ساده‌سازی شرایط پیچیده طبیعی و امکان مطالعه جامع در زمان و شرایط محدود حذف و از الک ۱۰ میلی‌متری عبور داده و به خوبی مخلوط شد (Agassi and Bradford, 1999; Kukul and Sarkar, 2011). 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 (Defersha *et al.*, 2011; Khaledi Darvishan *et al.*, 2014). نمونه خاک مورد نظر در دو لایه ۵ سانتی‌متری در پلات ریخته و تا رسیدن به وزن مخصوص خاک منطقه مادری غلتک زده شد.

برای حصول اطمینان برای حداکثر مشابهت وزن مخصوص خاک غلتک‌خورده در شرایط آزمایشگاهی با وزن مخصوص خاک منطقه مادری و تعیین تعداد دفعات غلتک‌زدن از لوله پی‌وی سی پر شده از سیمان برای اندازه‌گیری استفاده شد (Hawke *et al.*, 2006). بعد از ریختن لایه اول، خاک به صورت عرضی شیار داده شد تا از انقطاع بین لایه اول و دوم جلوگیری شود. سپس، آزمایش‌های مزبور در سه تکرار و در پلات آزمایش روی خاک‌های آماده‌شده اجرا شد. بعد از هر آزمایش ۳ تا ۷ سانتی‌متر از خاک مورد نظر در پلات‌ها جهت آزمایش‌های بعدی تعویض شد (Armstrong *et al.*, 2011). در ادامه و قبل از شروع آزمایش‌ها، نمونه‌های خاک برای رسیدن به رطوبت طبیعی منطقه با بارش غیرفرساینده با شدت ۵ میلی‌متر در ساعت مرطوب شد (Khaledi Darvishan *et al.*, 2014). برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در آزمایش‌ها مانند درصد ماسه، لای و رس، وزن مخصوص، pH، هدایت الکتریکی، ماده آلی، نیتروژن کل و رطوبت حجمی اندازه‌گیری و به ترتیب ۶۲ درصد، ۱۶ درصد و ۲۲ درصد، ۱/۴۶ گرم در سانتی‌متر مکعب، ۷/۶۵، ۱۹۵ میکرو زیمنس بر سانتی‌متر، ۲/۶۱ درصد، ۰/۱۳ و ۱۲±۳ درصد به دست آمد. بر اساس اندازه‌گیری‌های انجام‌پذیرفته، خاک منطقه دارای بافت لوم رسی شنی با ماده آلی نسبتاً زیاد و در رده خاک‌های با مرغوبیت زیاد و پس‌دوگلی با رنگ خاکستری تیره قرار می‌گیرد، لذا دانه‌بندی، تهویه و ظرفیت نگهداری آب خاک مناسب ارزیابی شد.

حسب میلی گرم و از تقسیم مقادیر مذکور بر میانگین مدت زمان RIIIE در شیبها و شدت‌های مختلف بر حسب میلی گرم بر ثانیه و ایجاد امکان شرایط مقایسه‌ای شدت هدررفت خاک به دست آمد.

درجه سانی‌گراد خشک و توزین شد. از مجموع پاشمان جهت بالادست و جهت پایین دست فنجان پاشمان، پاشمان کل و از تفاضل پاشمان جهت پایین دست با جهت بالادست پاشمان خالص به دست آمد. مقادیر رسوب اولیه در شرایط آزمایشی بر



شکل ۱. فنجان پاشمان (اقتباس از Khaledi Darvishan et al., 2014) و پلات مورد استفاده با موقعیت فنجان‌های پاشمان در پایین، وسط و بالادست پلات

شدت‌های مختلف ۳۰، ۶۰ و ۹۰ میلی متر بر ساعت نیز اختلاف معنادار در سطح ۵ درصد برای هر سه شیب به دست آمد.

جدول ۱. مدت زمان اندازه‌گیری RIIIE (ثانیه) در شدت‌ها و شیب‌های مختلف مورد آزمایش

| شدت بارش<br>(میلی متر بر<br>ساعت) | شیب پلات (درصد) |             |             |
|-----------------------------------|-----------------|-------------|-------------|
|                                   | ۵               | ۱۵          | ۲۵          |
| ۳۰                                | ۳۴۴ ± ۲۴/۸۲     | ۳۹۲ ± ۲۷/۵۰ | ۴۹۶ ± ۳۱/۴۳ |
| ۶۰                                | ۲۱۱ ± ۲۷/۴۰     | ۱۸۴ ± ۱۲/۸۹ | ۱۶۵ ± ۲۲/۴۳ |
| ۹۰                                | ۱۲۶ ± ۲۶/۰۱     | ۱۴۹ ± ۱/۷۳  | ۱۴۷ ± ۵/۷۷  |

همچنین، نتایج جدول ۱ نشان می‌دهد که بیشترین مدت زمان برای فرسایش ناشی از اثر قطره‌های بارش برای شدت ۳۰ میلی متر بر ساعت و در شیب ۲۵ درصد و کمترین مدت زمان برای آن در شدت ۹۰ میلی متر بر ساعت و در شیب ۵ درصد رخ داده است. دقت در نتایج بیانگر روند افزایشی مدت زمان فرسایش ناشی از اثر قطره‌های بارش در شدت ۳۰ و ۹۰ میلی متر بر ساعت با افزایش شیب بود، ولی در شدت ۶۰ میلی متر بر ساعت روند کاهشی با افزایش شیب مشاهده شد. چون در شدت ۶۰ میلی متر بر ساعت قطر قطره‌ها نسبت به شدت ۳۰ میلی متر بر ساعت بزرگ‌تر شد و داوم بارش آن نسبت به شدت بارش ۹۰ میلی متر بر ساعت بیشتر بود، همچنین قطر قطره‌ها با اختلاف ۰/۰۱ بسیار ناچیز است، لذا رفتار متفاوتی

## تجزیه و تحلیل‌های آماری

پس از اندازه‌گیری غلظت رسوب ناشی از فرسایش RIIIE داده‌های حاصل از انجام آزمایش‌ها در اکسل، دسته‌بندی و بانک اطلاعاتی آن‌ها تهیه شد. قبل از هر گونه آنالیز آماری، نرمال بودن داده‌ها با استفاده از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف آزمایش و داده‌های غیرنرمال از طریق یکی از روش‌های متداول تبدیل داده (لگاریتم، جذر) تبدیل و آزمون شد. همچنین، از آزمون همگنی واریانس Levene به منظور بررسی همگنی واریانس تیمارهای مختلف استفاده شد. مقایسه میانگین گروه‌های مختلف با استفاده از آزمون‌های ANOVA و دانکن صورت گرفت و برای بررسی اثر یکجانبه و متقابل شیب و شدت بارندگی و تغییرات محلی در طول پلات از آزمون‌های GLM استفاده شد.

## نتایج و بحث

### مدت زمان RIIIE در شیب‌ها و شدت‌های مختلف

نتایج حاصل از میانگین و انحراف معیار مدت زمان اندازه‌گیری RIIIE در شیب‌ها و شدت‌های مختلف در سه تکرار در جدول ۱ آمده است. مقایسه میانگین داده‌های اندازه‌گیری شده با استفاده از آزمون دانکن بیانگر اختلاف معنادار بین مدت زمان اندازه‌گیری RIIIE در شیب ۲۵ با ۵ و ۱۵ درصد و نبود اختلاف معنادار در شیب ۵ با ۱۵ درصد بود. همچنین، در

به‌دست آمده از آزمایش‌های شبیه‌سازی RIIIE طی فرایند تکاملی فرسایش در سه شیب ۵، ۱۵ و ۲۵ درصد، سه شدت ۳۰، ۶۰ و ۹۰ میلی‌متر بر ساعت، در سه تکرار و در سه محل بالا، وسط و پایین در طول پلات در جدول ۳ آمده است. همچنین، نتایج حاصل از آزمون آنالیز واریانس یک‌طرفه برای مقایسه میانگین متغیرها و گروه‌بندی آن‌ها به‌روش دانکن در جدول ۴ آمده است.

نتایج جدول ۳ بیانگر تأثیرپذیری متغیرهای وابسته از شدت بارش در سطح ۹۹ درصد است که با نتایج Defersha and Melesse (2012) مبنی بر تأثیرپذیری هدررفت خاک با افزایش شدت بارش مطابقت داشت و با نتایج Liu و همکاران (2015) مبنی بر عدم تأثیرپذیری هدررفت خاک با افزایش شدت بارش همخوانی نداشت. همچنین، نتایج تجزیه واریانس یک‌طرفه نیز به‌صورت جزئی‌تر گویای این مطلب بود که بین متغیرها در شدت بارش ۳۰ با ۹۰ و شدت بارش ۶۰ با ۹۰ اختلاف معناداری در سطح ۹۹ درصد وجود داشت. اما، در شدت بارش ۳۰ با ۶۰ برای مقادیر رسوب پاشمان خالص و مقادیر رسوب در واحد زمان، بالادست و پایین‌دست ظروف پاشمان و پاشمان کل اختلاف معنادار مشاهده نشد. نتایج جدول ۲ نیز بیانگر اختلاف ناچیز بین مقادیر رسوب در شدت ۳۰ با ۶۰ میلی‌متر بر ساعت و اختلاف زیاد بین مقادیر رسوب ۳۰ با ۹۰ و ۶۰ با ۹۰ میلی‌متر بر ساعت بود. لذا، می‌توان به‌طور کلی بیان کرد با افزایش شدت بارش، میزان پاشمان ناشی از قطره‌ها (RIIE) کاهش یافت که به‌دلیل ارتباط شدت بارش با دوام بارش است. به‌طور کلی، هرچه شدت بارش بیشتر باشد، دوام بارش کمتر است؛ از این‌رو مدت زمان فرسایش ناشی از اثر قطره‌های بارش کمتر خواهد بود که البته این اختلاف به‌دلیل افزایش توان باران و در نهایت افزایش قدرت فرساینده‌گی در واحد سطح تا حدی تعدیل می‌شود.

بنابراین، افزایش تخریب ناشی از اثر قطره‌های باران در شدت‌های کم با تداوم بیشتر بارش، کاهش چسبندگی میان ذرات به‌دلیل خیس شدن خاک‌دانه‌ها را به‌دنبال دارد که در نهایت، به افزایش تخریب پاشمانی منجر می‌شود؛ اما تأثیرپذیری رسوب در واحد زمان متغیرهای مورد بررسی، در شدت بارش ۳۰ با ۶۰ میلی‌متر بر ساعت معنادار نبود. دوام کمتر شدت بارش ۶۰ نسبت به ۳۰ احتمالاً به‌دلیل بزرگ‌تر بودن میانگین قطر قطره‌های باران (Abdollahi et al., 2013; Sadeghi et al., 2013) همچنین سرعت و انرژی جنبشی ناشی از قطره‌ها و در نهایت افزایش قدرت فرساینده‌گی باران در شدت ۶۰ میلی‌متر بر ساعت است که با یافته‌های بیشتر محققان مثل Valettea et al. (2006)، Barry et al. (2010)، Bhattacharyya et al. (2010) و

نسبت به شدت بارش ۳۰ و ۹۰ میلی‌متر بر ساعت روی مقادیر رسوب در مؤلفه‌های RIIIE نشان داد. همچنین، در این شدت و در شیب ۲۵ درصد به دلیل هم‌افزایی مثبت شیب و شدت بارش بر فرسایش خاک مدت زمان RIIIE کاهش پیدا کرد و روندی متفاوت نسبت به دو شدت دیگر به‌دست آمد.

#### – تغییرپذیری متغیرهای RIIIE در شیب‌ها، شدت‌ها و محل‌های مختلف در طول پلات

نتایج حاصل از میانگین و انحراف معیار مقادیر رسوب و مقادیر رسوب در واحد زمان متغیرهای بالادست و پایین‌دست فنجان‌های پاشمان، پاشمان کل و پاشمان خالص در جدول ۲ آمده است. نتایج جدول ۲ بیانگر افزایش مقادیر رسوب و مقادیر رسوب در واحد زمان برای متغیرها با افزایش شدت بارش است، به‌طوری‌که نسبت میانگین مقادیر رسوب در شیب ۵ درصد در شدت ۳۰ به ۶۰ و ۶۰ به ۹۰ میلی‌متر بر ساعت ۲/۵ برابر و در شدت ۳۰ به ۹۰ میلی‌متر بر ساعت حدوداً ۷ برابر شده است. همچنین، نسبت میانگین مقادیر رسوب در شیب ۱۵ درصد برای شدت ۳۰ به ۶۰، ۶۰ به ۹۰ و ۳۰ به ۹۰ میلی‌متر بر ساعت به‌ترتیب حدود ۲، ۳/۵ و ۷/۵ برابر و در شیب ۲۵ درصد به‌ترتیب حدود ۱، ۷/۵ و ۶/۵ برابر به‌دست آمد. در شیب ۵ و ۱۵ درصد بین نسبت‌های مقادیر رسوب در شدت ۳۰ به ۶۰ و ۶۰ درصد و در شدت ۶۰ به ۹۰ و ۹۰ به ۹۰ میلی‌متر بر ساعت نسبت بسیار بالایی به‌دست آمد، به‌طوری‌که با دقت در مقادیر جدول‌های ۱ و ۲ نیز می‌توان اذعان کرد که در شدت‌های بالا با توجه به‌مدت زمان وقوع فرایند RIIIE حدود ۱۲۶ تا ۱۴۹ ثانیه، مرحله فرسایش بین‌شیاری طی فرایند تکاملی فرسایش نمایان می‌شود. لذا، در عمل سهم فرایند RIIIE در فرسایش کل بسیار ناچیز برآورد شد. همچنین، بررسی نسبت میانگین مقادیر رسوب در واحد زمان برای متغیرها در شدت‌های ۳۰، ۶۰، ۶۰ به ۹۰ و ۳۰ به ۹۰ میلی‌متر بر ساعت، در شیب ۵ درصد حدود ۱/۵، ۱/۵ و ۲/۵ برابر و در شیب ۱۵ درصد حدود ۱، ۲/۵ و ۳ و در شیب ۲۵ درصد حدود ۰/۵، ۶/۵ و ۲ به‌دست آمد که بیانگر هم‌افزایی تأثیر متقابل شیب‌ها و شدت‌های بالا در مقادیر رسوب است.

کاهش نسبت مقادیر رسوب در واحد زمان متغیرها در شدت و شیب‌های کم به زیاد نسبت به مقادیر رسوب متغیرها علی‌رغم روند افزایشی، بیانگر افزایش شدت تخریب پاشمان در واحد زمان در شدت و شیب‌های زیاد است.

#### – مقایسه آماری RIIIE در شرایط مختلف آزمایشی

نتایج حاصل از آزمون‌های تجزیه واریانس دوطرفه برای داده‌های

به نحوی که اثر شدت ۶۰ میلی‌متر بر ساعت و شیب ۲۵ درصد به‌صورت هم‌افزایی باعث افزایش مقادیر رسوب در مؤلفه‌های RIIIE شده است.

Goebes et al. (2014) همخوانی دارد. همچنین، نتایج جدول ۲ نشان‌دهنده رفتار متفاوت مقادیر رسوب مؤلفه‌های RIIIE در شدت ۶۰ میلی‌متر بر ساعت به‌خصوص در شیب ۲۵ درصد بود.

جدول ۲. نتایج آماره‌های توصیفی متغیرهای RIIIE در شیب‌ها، شدت‌ها و محل‌های مختلف در طول پلات

| پاشمان خالص                       |      |      | پاشمان کل                         |      |      | پایین‌دست                         |      |      | بالادست                           |      |      | میانگین<br>سه تکرار<br>فنجان‌ها<br>شیب<br>(درصد) | مقدار<br>کل<br>رسوب<br>(میلی‌گرم) |
|-----------------------------------|------|------|-----------------------------------|------|------|-----------------------------------|------|------|-----------------------------------|------|------|--|-----------------------------------|
| شدت بارندگی<br>(میلی‌متر بر ساعت) |      |      | شدت بارندگی<br>(میلی‌متر بر ساعت) |      |      | شدت بارندگی<br>(میلی‌متر بر ساعت) |      |      | شدت بارندگی<br>(میلی‌متر بر ساعت) |      |      |  |                                   |
| ۹۰                                | ۶۰   | ۳۰   | ۹۰                                | ۶۰   | ۳۰   | ۹۰                                | ۶۰   | ۳۰   | ۹۰                                | ۶۰   | ۳۰   |  |                                   |
| ۳۰                                | ۷۰   | ۳۷۰  | ۱۲۰                               | ۲۸۰  | ۱۱۸۰ | ۸۰                                | ۱۷۰  | ۷۸۰  | ۴۰                                | ۱۱۰  | ۴۱۰  | پایین  |                                   |
| ۳۰                                | ۳۰   | ۱۱۰  | ۱۳۰                               | ۳۴۰  | ۶۸۰  | ۸۰                                | ۲۰۰  | ۳۹۰  | ۵۰                                | ۱۶۰  | ۲۸۰  | وسط  | ۵                                 |
| ۱۰                                | ۶۰   | ۱۷۰  | ۱۷۰                               | ۴۲۰  | ۷۰۰  | ۹۰                                | ۲۴۰  | ۴۳۰  | ۸۰                                | ۱۹۰  | ۲۷۰  | بالا   |                                   |
| ۲۰                                | ۵۰   | ۲۱۰  | ۱۴۰                               | ۳۵۰  | ۸۵۰  | ۸۰                                | ۲۰۰  | ۵۳۰  | ۶۰                                | ۱۵۰  | ۳۲۰  | میانگین کل پلات                                  |                                   |
| ۲۸                                | ۴۴   | ۳۲۰  | ۴۵                                | ۹۴   | ۶۱۰  | ۲۹                                | ۴۸   | ۴۶۳  | ۲۳                                | ۵۸   | ۱۶۱  | انحراف معیار                                     |                                   |
| ۳۰                                | ۵۰   | ۳۰   | ۱۲۰                               | ۲۰۰  | ۲۷۰  | ۸۰                                | ۱۳۰  | ۱۵۰  | ۵۰                                | ۸۰   | ۱۲۰  | پایین  |                                   |
| ۳۰                                | ۱۱۰  | ۴۱۰  | ۱۷۰                               | ۵۷۰  | ۱۱۷۰ | ۱۰۰                               | ۳۴۰  | ۷۹۰  | ۷۰                                | ۲۳۰  | ۳۸۰  | وسط  | ۱۵                                |
| ۲۰                                | ۲۲۰  | ۵۳۰  | ۱۷۰                               | ۶۳۰  | ۱۳۶۰ | ۹۰                                | ۴۲۰  | ۹۴۰  | ۸۰                                | ۲۱۰  | ۴۲۰  | بالا   |                                   |
| ۳۰                                | ۱۲۰  | ۳۲۰  | ۱۵۰                               | ۴۷۰  | ۹۴۰  | ۹۰                                | ۳۰۰  | ۶۳۰  | ۶۰                                | ۱۷۰  | ۳۱۰  | میانگین کل پلات                                  |                                   |
| ۱۴                                | ۱۰۳  | ۲۶۵  | ۵۰                                | ۲۱۹  | ۵۵۰  | ۲۸                                | ۱۵۴  | ۳۹۵  | ۲۴                                | ۷۵   | ۱۷۳  | انحراف معیار                                     |                                   |
| ۴۰                                | ۵۰   | ۶۰   | ۱۱۰                               | ۱۹۰  | ۳۵۰  | ۷۰                                | ۱۲۰  | ۲۱۰  | ۳۰                                | ۷۰   | ۱۴۰  | پایین  |                                   |
| ۴۰                                | ۴۹۰  | ۴۶۰  | ۱۶۰                               | ۱۳۴۰ | ۱۰۴۰ | ۱۰۰                               | ۹۱۰  | ۷۵۰  | ۶۰                                | ۴۲۰  | ۲۹۰  | وسط  | ۲۵                                |
| ۴۰                                | ۴۲۰  | ۲۴۰  | ۱۶۰                               | ۱۵۹۰ | ۱۳۰۰ | ۱۰۰                               | ۱۰۱۱ | ۷۷۰  | ۶۰                                | ۵۸۰  | ۵۳۰  | بالا   |                                   |
| ۴۰                                | ۳۲۰  | ۲۵۰  | ۱۴۰                               | ۱۰۴۰ | ۹۰۰  | ۹۰                                | ۶۸۰  | ۵۷۰  | ۵۰                                | ۳۶۰  | ۳۲۰  | میانگین کل پلات                                  |                                   |
| ۲۴                                | ۳۷۷  | ۳۶۲  | ۴۷                                | ۸۴۵  | ۷۶۰  | ۳۲                                | ۵۸۶  | ۵۳۹  | ۱۷                                | ۲۹۱  | ۲۵۴  | انحراف معیار                                     |                                   |
| ۰/۲۷                              | ۰/۳۱ | ۱/۰۸ | ۰/۹۲                              | ۱/۳۱ | ۳/۴۴ | ۰/۶۰                              | ۰/۸۱ | ۲/۲۶ | ۰/۳۲                              | ۰/۵۰ | ۱/۱۸ | پایین  |                                   |
| ۰/۲۳                              | ۰/۱۵ | ۰/۳۱ | ۱/۰۰                              | ۱/۶۰ | ۱/۹۶ | ۰/۶۱                              | ۰/۹۳ | ۱/۱۴ | ۰/۳۹                              | ۰/۷۸ | ۰/۸۳ | وسط  | ۵                                 |
| ۰/۰۴                              | ۰/۲۶ | ۰/۴۸ | ۱/۳۵                              | ۲/۰۱ | ۲/۰۵ | ۰/۶۹                              | ۱/۱۴ | ۱/۲۶ | ۰/۶۶                              | ۰/۸۸ | ۰/۷۸ | بالا   |                                   |
| ۰/۱۸                              | ۰/۲۴ | ۰/۶۲ | ۱/۰۹                              | ۱/۶۴ | ۲/۴۸ | ۰/۶۳                              | ۰/۹۶ | ۱/۵۵ | ۰/۴۶                              | ۰/۷۲ | ۰/۹۳ | میانگین کل پلات                                  |                                   |
| ۰/۲۳                              | ۰/۲۱ | ۰/۹۳ | ۰/۳۶                              | ۰/۴۵ | ۱/۷۹ | ۰/۲۴                              | ۰/۲۳ | ۱/۳۵ | ۰/۱۸                              | ۰/۲۹ | ۰/۴۷ | انحراف معیار                                     |                                   |
| ۰/۲۲                              | ۰/۲۶ | ۰/۰۸ | ۰/۸۳                              | ۱/۱۱ | ۰/۶۹ | ۰/۵۳                              | ۰/۶۸ | ۰/۳۹ | ۰/۳۱                              | ۰/۴۲ | ۰/۳۱ | پایین  |                                   |
| ۰/۲۰                              | ۰/۵۹ | ۱/۰۵ | ۱/۱۴                              | ۳/۰۹ | ۲/۹۹ | ۰/۶۷                              | ۱/۸۴ | ۲/۰۲ | ۰/۴۷                              | ۱/۲۵ | ۰/۹۷ | وسط  | ۱۵                                |
| ۰/۱۱                              | ۱/۱۷ | ۱/۳۴ | ۱/۱۳                              | ۳/۴۴ | ۳/۴۷ | ۰/۶۱                              | ۲/۳۱ | ۲/۴۱ | ۰/۵۲                              | ۱/۱۴ | ۱/۰۷ | بالا   |                                   |
| ۰/۱۸                              | ۰/۶۷ | ۰/۸۳ | ۱/۰۴                              | ۲/۵۵ | ۲/۳۹ | ۰/۶۰                              | ۱/۶۱ | ۱/۶۱ | ۰/۴۳                              | ۰/۹۴ | ۰/۷۸ | میانگین کل پلات                                  |                                   |
| ۰/۰۹                              | ۰/۵۶ | ۰/۶۸ | ۰/۳۴                              | ۱/۱۹ | ۱/۴۰ | ۰/۱۸                              | ۰/۸۴ | ۱/۰۱ | ۰/۱۷                              | ۰/۴۱ | ۰/۴۴ | انحراف معیار                                     |                                   |
| ۰/۲۵                              | ۰/۳۰ | ۰/۱۳ | ۰/۷۳                              | ۱/۱۴ | ۰/۷۰ | ۰/۴۹                              | ۰/۷۲ | ۰/۴۲ | ۰/۲۴                              | ۰/۴۲ | ۰/۲۹ | پایین  |                                   |
| ۰/۳۰                              | ۲/۹۵ | ۰/۹۳ | ۱/۰۶                              | ۸/۰۹ | ۲/۱۰ | ۰/۶۸                              | ۵/۵۲ | ۱/۵۱ | ۰/۳۸                              | ۲/۵۷ | ۰/۵۹ | وسط  | ۲۵                                |
| ۰/۲۹                              | ۲/۵۷ | ۰/۴۷ | ۱/۰۹                              | ۹/۶۴ | ۲/۶۲ | ۰/۶۹                              | ۶/۱۰ | ۱/۵۵ | ۰/۴۰                              | ۳/۵۳ | ۱/۰۷ | بالا   |                                   |
| ۰/۲۸                              | ۱/۹۴ | ۰/۵۱ | ۰/۹۶                              | ۶/۲۹ | ۱/۸۱ | ۰/۶۲                              | ۴/۱۱ | ۱/۱۶ | ۰/۳۴                              | ۲/۱۸ | ۰/۶۵ | میانگین کل پلات                                  |                                   |
| ۰/۱۶                              | ۲/۲۸ | ۰/۷۳ | ۰/۳۲                              | ۵/۱۲ | ۱/۵۳ | ۰/۲۲                              | ۳/۵۵ | ۱/۰۹ | ۰/۱۲                              | ۱/۷۷ | ۰/۵۱ | انحراف معیار                                     |                                   |

مقدار  
رسوب  
در واحد  
زمان  
(میلی‌گرم  
بر ثانیه)

جدول ۳. آنالیز واریانس دوطرفه برای کل متغیرها با استفاده از GLM

| متغیر وابسته                  | شدت           | شیب    | محل  | شدت × شیب | شدت × محل | شیب × محل |
|-------------------------------|---------------|--------|------|-----------|-----------|-----------|
| پاشمان بالادست                | درجه آزادی    | ۲      | ۲    | ۴         | ۴         | ۴         |
|                               | مقدار آماره F | ۱۳۱/۱۵ | ۰/۰۳ | ۳۶/۹۷     | ۳/۰۶      | ۲/۶۰      |
|                               | سطح معناداری  | ۰/۰۰   | ۰/۷۴ | ۰/۰۰      | ۰/۰۲      | ۰/۰۵      |
| پاشمان پایین دست              | درجه آزادی    | ۲      | ۲    | ۴         | ۴         | ۴         |
|                               | مقدار آماره F | ۹۲/۷۶  | ۲/۳۰ | ۲۳/۸۱     | ۲/۴۱      | ۳/۱۲      |
|                               | سطح معناداری  | ۰/۰۰   | ۰/۱۱ | ۰/۰۰      | ۰/۰۵      | ۰/۰۲      |
| پاشمان کل (میلی گرم)          | درجه آزادی    | ۲      | ۲    | ۴         | ۴         | ۴         |
|                               | مقدار آماره F | ۱۱۳/۰۱ | ۱/۶۱ | ۳۰/۳۷     | ۲/۸۶      | ۲/۸۲      |
|                               | سطح معناداری  | ۰/۰۰   | ۰/۲۱ | ۰/۰۰      | ۰/۰۳      | ۰/۰۳      |
| پاشمان خالص                   | درجه آزادی    | ۲      | ۲    | ۴         | ۴         | ۴         |
|                               | مقدار آماره F | ۲۷/۰۲  | ۷/۳۲ | ۲/۰۲      | ۱/۱۸      | ۴/۶۹      |
|                               | سطح معناداری  | ۰/۰۰   | ۰/۰۰ | ۰/۱۴      | ۰/۳۳      | ۰/۰۰      |
| پاشمان بالادست                | درجه آزادی    | ۲      | ۲    | ۴         | ۴         | ۴         |
|                               | مقدار آماره F | ۲۷/۳۴  | ۳/۸۳ | ۳۷/۶۵     | ۳/۷۷      | ۰/۳۹      |
|                               | سطح معناداری  | ۰/۰۰   | ۰/۲۷ | ۰/۰۰      | ۰/۰۱      | ۰/۸۱      |
| پاشمان پایین دست              | درجه آزادی    | ۲      | ۲    | ۴         | ۴         | ۴         |
|                               | مقدار آماره F | ۲۸/۲۹  | ۱/۰۲ | ۲۳/۶۸     | ۶/۳۹      | ۳/۱۵      |
|                               | سطح معناداری  | ۰/۰۰   | ۰/۳۷ | ۰/۰۰      | ۰/۰۰      | ۰/۰۲      |
| پاشمان کل (میلی گرم بر ثانیه) | درجه آزادی    | ۲      | ۲    | ۴         | ۴         | ۴         |
|                               | مقدار آماره F | ۲۱/۸۸  | ۱/۵۴ | ۳۱/۳۹     | ۳/۷۰      | ۱/۵۴      |
|                               | سطح معناداری  | ۰/۰۰   | ۰/۲۲ | ۰/۰۰      | ۰/۰۱      | ۰/۲۱      |
| پاشمان خالص                   | درجه آزادی    | ۲      | ۲    | ۴         | ۴         | ۴         |
|                               | مقدار آماره F | ۱۰/۰۷  | ۶/۳۷ | ۲/۱۱      | ۲/۲۶      | ۴/۶۴      |
|                               | سطح معناداری  | ۰/۰۰   | ۰/۰۰ | ۰/۱۳      | ۰/۰۷      | ۰/۰۰      |

جدول ۴. نتایج گروه‌بندی متغیرهای وابسته با استفاده از روش دانکن

| متغیر وابسته                  | شدت (میلی متر بر ساعت) |    |    |   |    |    |       | تغییرات محل در طول پلات |      |
|-------------------------------|------------------------|----|----|---|----|----|-------|-------------------------|------|
|                               | ۳۰                     | ۶۰ | ۹۰ | ۵ | ۱۵ | ۲۵ | پایین | وسط                     | بالا |
| پاشمان بالادست                | c                      | b  | a  | a | a  | a  | a     | a                       | b    |
| پاشمان پایین دست              | c                      | b  | a  | a | a  | a  | a     | a                       | b    |
| پاشمان کل (میلی گرم)          | c                      | b  | a  | a | a  | a  | a     | a                       | b    |
| پاشمان خالص                   | b                      | b  | a  | a | a  | b  | a     | a                       | a    |
| پاشمان بالادست                | a                      | a  | b  | a | a  | a  | b     | a                       | a    |
| پاشمان پایین دست              | b                      | b  | a  | a | a  | a  | a     | a                       | b    |
| پاشمان کل (میلی گرم بر ثانیه) | a                      | a  | b  | a | a  | a  | b     | a                       | a    |
| پاشمان خالص                   | b                      | b  | a  | a | a  | a  | b     | a                       | a    |

در شیب ۵ با ۱۵ و ۵ با ۲۵ درصد است که با تحقیقات Fu و همکاران (2011) و Yusefi و همکاران (2014) مبنی بر افزایش میزان پاشمان در پایین دست با افزایش و در نتیجه مقادیر پاشمان خالص به دلیل افزایش نیروی قطره‌های باران از نیروی چسبندگی ذرات خاک برای جدایش ذرات خاک مطابقت داشت.

نتایج جدول‌های ۳ و ۴ همچنین، بیانگر نبود اختلاف معنادار متغیرها از شیب‌های ۵، ۱۵ و ۲۵ درصد غیر از پاشمان خالص در سطح ۹۹ درصد است. نبود اختلاف معنادار در همه متغیرها در شیب ۵ با ۱۵ و ۵ با ۲۵ و ۱۵ با ۲۵ درصد نشان‌دهنده عدم تأثیرپذیری متغیرها به غیر از پاشمان خالص

بالا و وسط پلات در یک گروه، و پایین پلات در گروه دیگر دسته‌بندی شده است که متأثر از آستانه مکانی شروع رواناب است، چون از ۲ تا ۳ متری بالادست پلات به دلیل ایجاد شیب هیدرولیکی جریان، اولین نشانه‌های آستانه زمانی شروع رواناب مشاهده می‌شد. لذا، از آستانه شروع رواناب تا زمان رسیدن رواناب به سرریز مدت زمانی صرف‌شده بر مقادیر رسوب فنجان‌های واقع در وسط و بالای پلات تأثیرگذار است، به طوری که مقادیر رسوب ناشی از RIIIE در فنجان پاشمان واقع در پایین پلات کمتر از وسط و بالای پلات بوده است.

### جمع‌بندی

پژوهش حاضر به منظور تحلیل مقایسه‌ای اثر شیب و شدت بر مؤلفه‌های فرسایش ناشی از اثر قطره‌های باران (RIIE) طی فرایند تکاملی فرسایش در شرایط آزمایشگاه شبیه‌ساز باران و فرسایش خاک در دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تربیت مدرس و روی خاک لوم رسی شنی تهیه‌شده از مراتع بیلاقی دامنه‌های شمالی البرز در حدفاصل جاده کدیر- کجور در پلات‌های ۱×۶ مترمربع در شیب‌های ۵، ۱۵ و ۲۵ درصد و در شدت‌های ۳۰، ۶۰ و ۹۰ میلی‌متر در ساعت مطابق با منحنی شدت، مدت و فراوانی ایستگاه سینوپتیک کجور، در سه تکرار و در بالادست و پایین‌دست فنجان پاشمان مورگان در سه محل بالا، وسط و پایین پلات اجرا شد. تحلیل نتایج مربوط به مدت زمان اندازه‌گیری RIIIE بیانگر روند افزایشی مدت زمان فرسایش ناشی از اثر قطره‌های بارش در شدت ۳۰ و ۹۰ میلی‌متر بر ساعت با افزایش شیب بود، ولی در شدت ۶۰ میلی‌متر بر ساعت روند کاهشی با افزایش شیب مشاهده شد. همچنین، نتایج مقایسه‌های آماری متغیرها در شرایط مختلف آماری بیانگر تأثیرپذیری تمامی متغیرهای بررسی‌شده شامل پاشمان بالادست و پایین‌دست و پاشمان کل و خالص از شدت بارش و عدم تأثیرپذیری همه متغیرها به غیر از پاشمان خالص از تغییرات مکانی بوده است. همچنین، تحلیل نتایج نشان‌دهنده معنادار نبودن اثر شیب بر متغیرها به جز پاشمان خالص بوده است. در مجموع، می‌توان جمع‌بندی کرد که در شرایط آزمایشگاهی، عمده مؤلفه‌های فرسایش ناشی از اثر قطره‌های باران از شدت باران و محل‌های قرارگیری فنجان‌های پاشمان تأثیر پذیرفته‌اند؛ اگرچه جمع‌بندی جامع و کامل نیازمند مطالعات جامع‌تر و طولانی‌تری است.

همچنین، با نظر (Ben-Hur and Agassi (1997) مبنی بر تأثیرگذاری شیب بر فرسایش‌پذیری و فرساینده‌گی و وجود روابط پیچیده حاکم بر میزان تخریب پاشمانی همخوانی داشت. با افزایش شیب از ۵ به ۲۵ درصد در شدت بارش ۶۰ برای همه متغیرها به غیر از پاشمان خالص در عین نبود اختلاف معنادار، روند افزایشی مشاهده شد. اما در شدت بارش ۳۰ و ۹۰ میلی‌متر بر ساعت با افزایش شیب از ۵ به ۱۵ درصد در بیشتر متغیرها روند افزایشی و از ۱۵ به ۲۵ درصد روند کاهشی مشاهده شد که با یافته‌های (Janeau et al. (2003) مبنی بر کاهش تخریب پاشمانی با افزایش شیب از ۹ درجه (۱۵ درصد) به ۲۳ درجه (۳۹ درصد) و نتایج (Liu et al. (2015) مبنی بر کاهش تخریب پاشمانی با افزایش شیب از ۱۱ درجه (۱۹ درصد) به بالاتر، همچنین یافته‌های (Misra and Rose (1995) مبنی بر رابطه غیرخطی بین شیب و تخریب پاشمانی مطابقت داشت. ولی با یافته‌های (Defersha and Melesse (2012) مبنی بر افزایش میزان هدررفت رسوب با افزایش شیب از ۹ درصد به ۲۵ درصد در سه نوع خاک متفاوت مطابقت نداشت، ولی آن‌ها نیز به رابطه غیرخطی بین شیب و هدررفت رسوب اذعان کرده‌اند، زیرا با افزایش شیب از ۲۵ درصد به ۴۵ درصد کاهش هدررفت مشاهده شد. دلیل تأثیر شیب بر تغییر پاشمان را می‌توان به زاویه برخورد قطره‌های باران به سطح زمین و تغییر مؤلفه‌های فرعی تقسیم‌شده از مقدار انرژی کل ورودی به محل ریزش نسبت داد، به نحوی که با افزایش شیب، مؤلفه نیروی موازی با سطح زمین افزایش می‌یابد و طبعاً میزان جدایش ناشی از پاشمان، به‌خصوص در جهت شیب، افزایش می‌یابد.

در ادامه همچنین اثر متقابل شیب با شدت، شدت با محل و شیب با محل از طریق آنالیز واریانس دوطرفه بررسی شد. نتایج آنالیز نشان داد اثر متقابل شیب با شدت غیر از پاشمان خالص، و متغیرهای مربوط به اثر متقابل شدت و محل غیر از مقادیر رسوب در واحد زمان پاشمان بالادست و پاشمان کل اختلاف معنادار وجود داشت. همچنین، تأثیرپذیری متغیرها از اثر متقابل شیب و محل در سطح ۹۹ درصد معنای‌دار ارزیابی شد.

نتایج آنالیز واریانس دوطرفه برای محل فنجان‌های پاشمان در بالا، وسط و پایین‌دست در طول پلات یا تحلیل تغییرات مکانی RIIIE در طول پلات گویای اختلاف معنادار در متغیرهای بررسی‌شده غیر از پاشمان خالص است. همچنین، نتایج جدول ۴ نشان می‌دهد که محل فنجان‌های پاشمان در

### REFERENCES

Abdollahi, Z., Sadeghi, S. H. R. and Khaledi Darvishan, A. V. (2013). Designing, manufacturing and testing rainfall simulator nozzles. *Water and Soil Conservation*, 20(6): 67-86. (In Farsi)

Agassi, M. and Bradford, J. M. (1999). Methodologies for Interrill Soil Erosion Studies. *Soil and Tillage Research*, 49(4), 277-287.



- Armstrong, A., Quinton, J. N., Heng, B. C. P. and Chandler, J. H. (2011). Variability of interrill erosion at low slopes. *Earth Surface Processes and Landforms*, 36(1), 97-106.
- Barry, D. A., Sander, G. C., Jomaa, S., Heng, B. C. P., Parlange, J. Y., Lisle, I. G. and Hogarth, W. L. (2010). Exact solutions of the Hairsine-Rose precipitation-driven erosion model for a uniform grain size soil. *Journal of Hydrology*, 389 (3-4), 399-405.
- Ben-Hur, M. and Agassi, M. (1997). Predicting interrill erodibility factor from measured infiltration rate. *Water Resources Research*, 33, 2409-2415.
- Bhattacharyya, R., Fullen, M. A., Davies, K. and Booth, C. A. (2010). Use of palm-mat geotextiles for rainsplash erosion control. *Geomorphology*, 119, 52-61.
- Brodowski, R. (2013). Soil detachment caused by divided rain power from raindrop parts splashed downward on a sloping surface. *Catena*, 105, 52-61.
- Bryan, R. B. (1979). The influence of slope angle on soil entrainment by sheetwash and rainsplash. *Earth Surface Processes*, 4, 43-58.
- Defersha, M. B., Quraishi, S. and Melesse, A., (2011). The effect of slope steepness and antecedent moisture content on interrill erosion, runoff and sediment size distribution in the highlands of Ethiopia. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(7), 2367-2375.
- Defersha, M. B., and Melesse, A. M. (2012). Effect of rainfall intensity, slope and antecedent moisture content on sediment concentration and sediment enrichment ratio. *Catena*, 90, 47-52.
- Ekern, P. C. (1950). Raindrop impact as a force initiating soil erosion. *Soil Science Society of America Proceedings*, 15, 7-10.
- Ellison, W. D. (1944). Studies of raindrop erosion. *Agricultural Engineering*, 25 (4), 131-136.
- Fan, J. C. and Wu, M. F. (1999, May). Effects of soil strength, texture, slope steepness and rainfall intensity on interrill erosion of some soils in Taiwan. *In 10<sup>th</sup> International Soil Conservation Organization meeting, Purdue University, USDA-ARS national soil erosion research laboratory*
- Foster, G. R., Meyer, L. D. and Onstad, C. A. (1977). An erosion equation derived from basic erosion principles. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 20, 678-682.
- Fu, S., Liu, B., Liu, H. and Xu, L. (2011). The effects of slope on interrill erosion at short slopes. *Catena*, 84, 29-34.
- Gerits, J. J. P., De Lima, J. L. M. P. and van Den Broek, T. M. W. (1990). Overland flow and erosion. *Process Studies in Hillslope Hydrology*, 173-214.
- Goebes, P., Seitz, S., Geißler, C., Lassu, T., Peters, P., Seeger, M., Nadrowski, K. and Scholten, T. (2014). Momentum or kinetic energy – How do substrate properties influence the calculation of rainfall erosivity? *Journal of Hydrology*, 517, 310-316.
- Hairsine, P. B. and Rose, C. W. (1991). Rainfall detachment and deposition: sediment transport in the absence of flow-driven processes. *Soil Science Society of America Journal*, 55, 320-324.
- Hawke, R. M., Price, A. G. and Bryan, R. B. (2006). The effect of initial soil water content and rainfall intensity on near-surface soil hydrologic conductivity: a laboratory investigation. *Catena*, 65(3), 237-246.
- Janeau, J. L., Bricquet, J. P., Planchon, O. and Valentin, C. (2003). Soil crusting and infiltration on steep slopes in northern Thailand. *European Journal of Soil Science*, 54, 543-553.
- Khaledi Darvishan, A., Sadeghi, S. H. R., Homaei, M. and Arabkhedri, M. (2014). Measuring sheet erosion using synthetic color contrast aggregates. *Hydrological Processes*, 28(15), 4463-4471.
- 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: 2-11.
- Kinnell, P. I. A. (2012). Raindrop induced saltation and enrichment of sediment discharged from sheet and interrill erosion areas. *Hydrological Processes*, 26(10), 1449-1456.
- Kukul, S. S. and Sarkar, M. (2011). Laboratory simulation studies on splash erosion and crusting in relation to surface roughness and raindrop size. *Journal of the Indian Society of Soil Science*, 59(1), 87-93
- Legout, C., Leguédou, S., Le Bissonnais, Y. and Malam Issa, O. (2005). Splash distance and size distributions for various soils. *Geoderma*, 124, 279-292.
- Liu, D., She D., Shao, G. and Chen, D. (2015). Rainfall intensity and slope gradient effects on sediment losses and splash from a saline-sodic soil under coastal reclamation. *Catena*, 128, 54-62.
- Misra, R. K. and Rose, C. W. (1995). An examination of the relationship between erodibility parameters and soil strength. *Australian Journal of Soil Research*, 33: 715-732.
- Montenegro, A. A. A., Abrantes, J. R. C. B., de Lima, J. L. M. P., Singh, V. P. and Santos, T. E. M. (2013). Impact of mulching on soil and water dynamics under intermittent simulated rainfall. *Catena*, 109, 139-149.
- Morgan, R. P. C. (1978). Field studies of rainsplash erosion. *Earth Surface Processes*, 3, 295-299.
- Poesen, J. and Torri, D. (1988). The effect of cup size on splash detachment and transport measurements; part I: field measurements. *Geomorphic processes in environments with strong seasonal contrasts. Vol. I. Hillslope processes., Catena Supplement*, 12, 113-126.
- Sadeghi, S. H. R., Abdollahi, Z. and Khaledi Darvishan, A. V. (2013). Experimental comparison of some techniques for estimating Natural Rain Drop Size

- Distribution in Caspian Sea Southern Coast, Iran. *Hydrological Sciences Journal*, 58(6): 1374-1382.
- Salles, C. and Poesen, J. (1999). Performance of an optical spectro pluviometer in measuring basic rain erosivity characteristics. *Journal of Hydrology*, 218, 142-156.
- Shi, Z. H., Yue, B. J., Wang, L., Fang, N. F., Wang, D., and Wu, F. Z. (2013). Effects of mulch cover rate on interrill erosion processes and the size selectivity of eroded sediment on steep slopes. *Soil Science Society of America Journal*, 77(1), 257-267.
- Terry, J. P. (1998). A rain splash component analysis to define mechanisms of soil detachment and transportation. *Australian Journal of Soil Research*, 36, 525-542.
- Torri, D. and Poesen, J. (1992). The effect of soil surface slope on raindrop detachment. *Catena*, 19, 561-578.
- Valettea, S., Prevosta Laurent, L. and Lucasa, J. (2006). SoDA project: A simulation of soil surface degradation by rainfall. *Gilles Computers & Graphics*, 30, 494-506.
- Yusefi, A., Farrokhian Firouzi, A. and Khalili Moghadam, B. (2014). Evaluation of temporal variation of splash erosion in different slopes and agricultural and forest land uses. *Journal of Soil and Water Resources Conservation*, 3(3), 11-20. (In Farsi)