

## اثر رگبارهای متوالی بر مؤلفه‌های فرسایش پاشمانی طی دو شدت مختلف بارندگی در شرایط آزمایشگاهی

محبوبه کیانی هرچگانی<sup>۱\*</sup> و سید حمیدرضا صادقی<sup>۲</sup>

۱. دانش‌آموخته دکتری گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس و عضو انجمن آبخیزداری ایران

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

(تاریخ دریافت ۱۳۹۵/۱۲/۱۰؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۶/۰۱/۳۰)

### چکیده

واضح است که هیچ فرسایشی اتفاق نمی‌افتد مگر اینکه ابتدا جدایش توسط قطرات باران یا رواناب رخ دهد. فرسایش ناشی از اثر قطرات باران (RIIE) در نتیجه انرژی قطرات باران اتفاق می‌افتد. بدین منظور مجموعه‌ای از آزمایش‌ها برای بررسی اثر رگبارهای متوالی بر مؤلفه‌های RIIE (مانند پاشمان بالادست، پاشمان پایین‌دست، پاشمان خالص، پاشمان کل و نسبت پاشمان بالادست/پایین‌دست) برنامه‌ریزی شد. آزمایش‌ها تحت شدت‌های بارندگی ۳۰ و ۹۰ میلی‌متر در ساعت و در شیب پلات ۵ درصد روی یک نمونه خاک جمع‌آوری شده از مراتع حوضه آبخیز کجور در شمال ایران در شرایط شبیه‌ساز باران و فرسایش خاک انجام پذیرفت. طبق نتایج مقایسه مؤلفه‌های پاشمان بالادست با پایین‌دست در شدت بارندگی ۳۰ و همچنین در شدت بارندگی ۹۰ میلی‌متر در ساعت در توالی‌های مختلف دلالت بر نبود اختلاف معنادار در آنها ( $P < 0/05$ ) با استفاده از آزمون تحلیل واریانس یک‌طرفه در نرم‌افزار آماری SPSS نسخه ۲۲ داشته است. همچنین تحلیل نتایج مقایسه‌ای مؤلفه‌های RIIE شامل پاشمان بالادست، پاشمان پایین‌دست و پاشمان کل در توالی سوم، چهارم و پنجم در دو شدت بارندگی ۳۰ و ۹۰ میلی‌متر در ساعت در سطح ۹۵ درصد معنادار بود. در حالی که پاشمان خالص و نسبت بالادست/پایین‌دست تحت شدت‌های بارندگی ۳۰ و ۹۰ میلی‌متر در ساعت در توالی‌های مختلف رگبار غیرمعنادار ( $P \leq 0/05$ ) بوده است. همچنین نتایج بیان‌کننده افزایش ۲/۵ برابری ضریب تغییرات پاشمان خالص و کل در شدت بارندگی ۳۰ میلی‌متر در ساعت نسبت به ۹۰ میلی‌متر در ساعت بود.

**کلیدواژگان:** پاشمان خالص، رگبار، شبیه‌ساز باران، فنجان پاشمان.

## مقدمه

در دهه‌های اخیر در نقاط مختلف جهان پژوهش‌های مختلفی در زمینه فرسایش خاک به دلیل پیامدهای مهم این نوع فرسایش‌ها صورت پذیرفته است. از پیامدهای مهم فرسایش آبی می‌توان به‌طور کلی به تخریب و کاهش حاصل‌خیزی خاک، کاهش ظرفیت آبراهه‌ها و مخازن و آلوده‌شدن محیط زیست اشاره کرد. فرسایش آبی برایند انرژی افتادن قطرات باران و جریان با همدیگر یا به‌تنهایی است. زمانی که تخریب خاک در نتیجه انرژی قطرات باران و در نبود جریان با عمق حفاظتی لازم رخ دهد، فرسایش ناشی از اثر قطرات باران<sup>۱</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 قطرات باران در سطح خاک، گسیختگی و فروپاشی قطرات درون لایه نازکی از جریان به‌صورت پاشش شعاعی<sup>۲</sup> دور از نقاط اثر و پاشش قطرات کوچک فرعی پرتاب‌شده در مسیر سهمی‌شکل<sup>۳</sup> دور از مکان برخورد قطرات اصلی، برای تأثیرات قطرات باران در خاک سطحی بیان شده است [۱] که در مرحله اول و دوم فرایند جدایش و در مرحله سوم فرایند انتقال رخ می‌دهد [۲-۴]. از دهه ۱۹۴۰ اندازه‌گیری کمی تخریب خاک و انتقال رسوبات ناشی از آن توسط قطرات باران با استفاده از فنجان‌های پاشمان [۱، ۵، ۶ و ۷] شروع شد و سپس مطالعات توسط محققان مختلف در عرصه‌های طبیعی مانند برایان، [۸]؛ توری و پوزن، [۹]؛ فن و وو، [۱۰]؛ باری و همکارانش، [۱۱] انجام پذیرفت. در شرایط آزمایشگاهی از دیدگاه‌های مختلفی فرسایش پاشمان ناشی از اثر قطرات باران و رواناب به‌صورت هم‌زمان بررسی شده است. از جمله لغوت و همکارانش [۱۳] رابطه بین اندازه خاک‌دانه‌های با قطر ۳ تا ۵ میلی‌متری و فاصله ذرات پاشمان‌شده ناشی از آنها را در خاک‌های غرب فرانسه بررسی کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد مقدار پاشمان خاک، فاصله خاک پاشمان‌یافته و توزیع اندازه ذرات خاک به پایداری ساختمان خاک بستگی دارد. بیشترین مقدار پاشمان مربوط به ذرات شن و کمترین آن مربوط به ذرات رس به‌دلیل چسبندگی زیاد ذرات و

استحکام ساختمان رس‌ها بیان شده است. گوبز و همکارانش [۱۴] نیز اثر فرسایندهای باران در هفت شدت بارندگی از ۵۲ تا ۱۱۶ میلی‌متر در ساعت را روی پنج نوع بافت مختلف خاک بررسی کردند. نتایج پژوهش آنها بیان‌کننده تأثیرپذیری متفاوت بافت‌های مختلف خاک از اندازه و سرعت قطرات باران بود. فو و همکارانش [۱۵] به بررسی فرسایش پاشمان در شیب‌های مختلف و در شدت بارندگی ۶۷ میلی‌متر در ساعت در شرایط آزمایشگاهی پرداختند. نتایج تحقیق آنها نشان‌دهنده افزایش مقدار کل پاشمان با افزایش شیب بود که دلیل آن افزایش نیروی قطرات باران از نیروی چسبندگی ذرات خاک و نیز نیروی گرانشی زمین برای جدایش ذرات خاک بیان شد. ما و همکارانش [۱۶] نیز ارتباط بین پایداری خاک‌دانه‌ها و اندازه ذرات پاشمان‌شده در چهار نوع خاک در شدت بارندگی حدود ۶۰ میلی‌متر در ساعت را بررسی کردند. آنها برای بررسی این ارتباط از آنالیز ابعادی<sup>۴</sup> و نسبت غنی‌شدگی<sup>۵</sup> استفاده و بیان کردند که ذرات پاشمان‌شده به وسیله قطرات باران در دامنه ۰/۲۵ تا ۰/۵ و ۰/۵ تا ۱ میلی‌متر قرار داشتند. خلیلی‌مقدم و همکارانش [۱۷] نیز اثر تغییر کاربری اراضی را بر فرسایش پاشمان در مناطق نیمه‌خشک ایران بررسی کردند. نتایج مطالعه آنها بیان‌کننده تأثیرپذیری فرسایش پاشمان از کاربری اراضی و شیوه مدیریت خاک بود. سعیدی و همکارانش [۱۸] به بررسی خصوصیات خاک‌های آهکی زاگرس مرکزی بر میزان فرسایش پاشمانی در دو شیب ۵ و ۱۵ درصد و دو شدت بارندگی ۵۰ و ۸۰ میلی‌متر در ساعت در شرایط آزمایشگاهی پرداختند و نتایج پژوهش آنها نشان داد قطر متوسط وزنی<sup>۶</sup> و نیروی برشی سطح<sup>۷</sup> به‌ترتیب بیشترین اثر مستقیم و غیرمستقیم را بر مؤلفه‌های پاشمان خاک‌های آهکی دارد. یوسفی و همکارانش [۱۹] به بررسی فرسایش پاشمان در شدت بارندگی ۹۰ میلی‌متر در ساعت با دوام‌های مختلف و با قطر قطرات باران ۲/۵ تا ۳ میلی‌متر و در شیب‌های ۵ و ۱۵ درصد پرداختند. نتایج مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون دانکن بیان‌کننده افزایش میزان پاشمان با افزایش شیب در سطح احتمال یک درصد بوده است. خالدی درویشان و شریفی‌مقدم [۲۰] اثر

4. Fractal Dimension (D)

5. Enrichment Ratio (ER)

6. Mean Weight Diameter (MWD)

7. Surface Shear Strength (SSS)

1. Raindrop Impact Induced Erosion (RIIE)

2. Spraying Radially

3. Parabolic Trajectories

قابلیت شبیه‌سازی دامنه شدت‌های ۳۰ تا ۱۲۰ میلی‌متر در ساعت با ضریب یکنواختی ۸۰ تا ۹۵ درصد متناسب با شرایط اقلیمی استان مازندران انجام پذیرفت که در کل سطح ۴۲ مترمربع واقع در دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تربیت مدرس است [۲۵]. آزمایش‌ها 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 ۷/۲۷، هدایت الکتریکی ۵/۱۲ میلی‌زیمنس بر متر، اکسیژن محلول ۳۰/۷ درصد، فسفر ۰/۱۷ میلی‌گرم بر لیتر و نترات ۴/۴۱ میلی‌گرم بر لیتر برای شبیه‌سازی باران استفاده شد. میانگین توان باران در شیب‌های ۳ درجه (۵ درصد) و برای شدت‌های بارندگی ۳۰ و ۹۰ میلی‌متر در ساعت با میانگین اندازه قطرات باران به ترتیب ۱/۵ و ۱/۵۸ میلی‌متر و نیز سرعت متناظر ۶/۱۸۶ و ۶/۶۷ متر بر ثانیه [۲۵ و ۲۶] به ترتیب ۰/۱۹ و ۰/۵۴ وات بر مترمربع به دست آمد [۲۱-۲۳].

#### - آماده‌سازی پلات‌های فرسایش

کلیه شبیه‌سازی باران‌ها با توجه به امکانات موجود در شبیه‌ساز باران و فرسایش خاک روی پلات‌های متوسط آزمایشگاهی با طول و عرض به ترتیب ۶ و ۱ متر و در سه تکرار با توجه به محدودیت اعتبار و زمان در دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تربیت مدرس انجام شد [۲۷]. در مرحله آماده‌سازی پلات‌ها از ۲۰ سانتی‌متر لایه سطحی منطقه، خاک مد نظر تهیه و به محل آزمایشگاه منتقل شد. نمونه خاک برداشت‌شده 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 ۳۶° ۲۴' انجام پذیرفت. 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 ۳۱ درصد، ۵۵ درصد و ۱۴ درصد، ۱/۴۶ گرم بر سانتی‌مترمکعب، ۷/۶۵، ۷/۶۴ میلی‌زیمنس بر متر، ۲/۶۱ درصد و ۱۲±۳ درصد به دست

قطرهای مختلف خاکدانه بر پاشمان خاک در شیب ۱۸ درصد و شدت بارندگی ۸۰ میلی‌متر بر ساعت را در شرایط آزمایشگاهی بررسی کردند که نتایج پژوهش آنها بیان‌کننده کاهش مقادیر مؤلفه‌های پاشمان با افزایش خاکدانه بود؛ اما بررسی‌ها درباره فرسایش ناشی از اثر قطرات باران (RIIE) به تنهایی با نظریه و پژوهش‌های کینل [۲] آغاز و توسط ایشان توسعه پیدا کرد. بدین‌منظور پژوهش‌هایی توسط صادقی و همکارانش [۲۱]؛ کیانی هرچگانی و همکارانش [۲۲] و صادقی و همکارانش [۲۳] درباره تأثیرپذیری مؤلفه‌های RIIE از شیب‌ها و شدت‌های مختلف بارندگی و نیز بررسی توزیع اندازه ذرات مواد پاشمان‌شده در شرایط مختلف آزمایشگاهی و در نهایت مقایسه توزیع اندازه ذرات مواد پاشمان‌شده با خاک مادری انجام پذیرفته است؛ اما جمع‌بندی سوابق تحقیق نشان می‌دهد تا کنون تحقیق جامعی در خصوص بررسی فرسایش ناشی از اثر قطرات باران (RIIE) طی توالی‌های مختلف شدت بارندگی گزارش نشده است. بدین‌منظور برای درک بهتر و افزایش دانش درباره فرسایش ناشی از اثر قطرات باران و در نتیجه ایجاد زمینه‌های مدل‌سازی بهتر و دقیق‌تر فرسایش و نیز اتخاذ مدیریت صحیح و بهینه در امر حفاظت خاک، تحقیق حاضر با هدف بررسی اثر توالی رگبار تحت دو شدت بارندگی ۳۰ و ۹۰ میلی‌متر در ساعت و در شیب ۵ درصد بر مؤلفه‌های مختلف فرسایش ناشی از اثر قطرات باران (پاشمان بالادست، پاشمان پایین‌دست، پاشمان خالص، پاشمان کل و نسبت پاشمان بالادست/پایین‌دست) در شرایط آزمایشگاهی برنامه‌ریزی شد.

#### مواد و روش‌ها

##### - آزمایش‌های شبیه‌سازی باران

انجام پژوهش حاضر در شیب ۵ درصد و شدت بارندگی ۳۰ و ۹۰ میلی‌متر در ساعت با دوام‌های به ترتیب ۳۰ و ۱۰ دقیقه متناسب با هر یک از شدت‌های یادشده با استفاده از نمودارهای شدت، مدت و فراوانی تهیه‌شده از آمار ساعتی ایستگاه هواشناسی کجور برای منطقه با دوره برگشت ۲۵ تا ۳۰ سال در شش رگبار متوالی با فاصله زمانی ۵ روز نسبت به یکدیگر به دلیل رسیدن به رطوبت پیشین خاک [۲۴] اجرا شد. همچنین آزمایش‌های شبیه‌سازی باران در سامانه شبیه‌ساز بزرگ باران با ۲۱ نازل در سه ردیف با

پلات به درون ظروف پاشمان در بالادست و پایین دست ظرف پاشمان به کمک شست و شو توسط آب مقطر به داخل بشر منتقل شده و در آن به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۰۵ درجه سانتی گراد خشک و توزین شد [۲۹]. 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 حسب میلی گرم و از تقسیم مقادیر یادشده بر میانگین مدت زمان RIIIE و مساحت فنجان پاشمان در شدت های مختلف بر حسب میلی گرم بر مترمربع بر ثانیه به دست آمد.

#### - تجزیه و تحلیل های آماری

پس از اندازه گیری مقادیر پاشمان در بالادست و پایین دست فنجان پاشمان در RIIIE داده های به دست آمده از انجام آزمایش ها در Excel دسته بندی و بانک اطلاعاتی آنها تهیه و مؤلفه های پاشمان خالص، کل و نسبت بالادست/پایین دست محاسبه شد. سپس از آزمون همگنی واریانس Levene به منظور بررسی همگنی واریانس تیمارهای مختلف و از آزمون شاپیرو-ویلک<sup>۱</sup> برای بررسی نرمال بودن داده ها استفاده شد [۲۰]. در نهایت، برای مقایسه مقادیر میانگین پاشمان بالادست با پایین دست به صورت جداگانه در شدت های بارندگی ۳۰ و ۹۰ میلی متر بر ساعت و همچنین مقایسه مؤلفه های RIIIE در دو شدت بارندگی ۳۰ با ۹۰ میلی متر بر ساعت طی توالی رگبارها از آزمون تحلیل واریانس یک طرفه<sup>۲</sup> در نرم افزار SPSS نسخه ۲۲ استفاده شد [۳۰].

#### نتایج و بحث

تحقیق حاضر با هدف مطالعه و مقایسه مؤلفه های RIIIE در دو شدت مختلف بارندگی طی توالی های رگبار در شرایط شبیه ساز باران و فرسایش خاک انجام پذیرفت. شکل ۱ نشان دهنده تصاویر مربوط به مقطع خاک پاشمان شده در شدت های بارندگی یادشده در شش توالی بارندگی بعد از انجام آزمایش هاست. همچنین شکل ۲ بیان کننده روند تغییرات مقادیر میانگین و انحراف معیار پاشمان بالادست و پایین دست در دو شدت بارندگی ۳۰ و ۹۰ میلی متر در ساعت طی شش رگبار متوالی است. دقت در شکل ۲ روند

آمد. براساس اندازه گیری های انجام پذیرفته، خاک منطقه با ماده آلی نسبتاً زیاد، در رده خاک های با مرغوبیت زیاد با رنگ خاکستری تیره و دانه بندی، تهویه و ظرفیت نگهداری آب خاک مناسب ارزیابی 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 سانتی متر در کف پلات تعبیه شد [۲۶]. سپس نمونه خاک هوای خشک شده ای که سنگ ریزه و بقایای گیاهی برای ساده سازی شرایط پیچیده طبیعی و امکان مطالعه جامع در زمان و شرایط محدود، حذف شده بودند و برای حفظ ساختار خاک دانه و نیز ساختمان دانه ای خاک از الک هشت میلی متری عبور داده [۲۸] و به خوبی مخلوط شده بود به صورت دو لایه پنج سانتی متری در پلات ریخته شد و تا رسیدن به جرم مخصوص خاک منطقه مادری غلتک زده شد. برای حصول اطمینان برای بیشترین تشابه جرم مخصوص خاک غلتک خورده در شرایط آزمایشگاهی با جرم مخصوص خاک منطقه مادری و تعیین تعداد دفعات غلتک زدن از لوله پی وی سی پر شده از سیمان استفاده شد. بعد از ریخته شدن لایه اول، خاک به صورت عرضی شیار داده شده تا از انقطاع بین لایه اول و دوم جلوگیری شود [۲۱، ۲۳ و ۲۴]. همچنین تلاش لازم برای حذف اثر رطوبت پیشین از طریق اندازه گیری مکرر رطوبت حجمی خاک قبل از آزمایش ها و تا حصول شرایط نسبتاً مشابه صورت گرفت. در ادامه و قبل از شروع آزمایش ها، نمونه های خاک برای رسیدن به رطوبت طبیعی منطقه در زمان نمونه برداری، با یک بارش غیرفرساینده با شدت پنج میلی متر در ساعت مرطوب شدند [۲۶].

#### - اندازه گیری مؤلفه های مختلف RIIIE

در پژوهش حاضر برای اندازه گیری پاشمان خاک و نمایش شرایط غالب بارندگی در جدا کردن و انتقال ذرات از سه فنجان پاشمان با قطر ۰/۲۵ متر و ارتفاع ۰/۱ متر [۲۶] 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 سرریز فلوم استفاده شد. برای اطمینان از تأثیر نداشتن RIIIE از رواناب طی فرایند تکاملی فرسایش، بعد از رسیدن اولین قطرات به سرریز فلوم، دهانه ظروف پاشمان سریع با قطعات ابری از پیش آماده شده پوشانده شد. ذرات خاک پاشمان شده از خاک

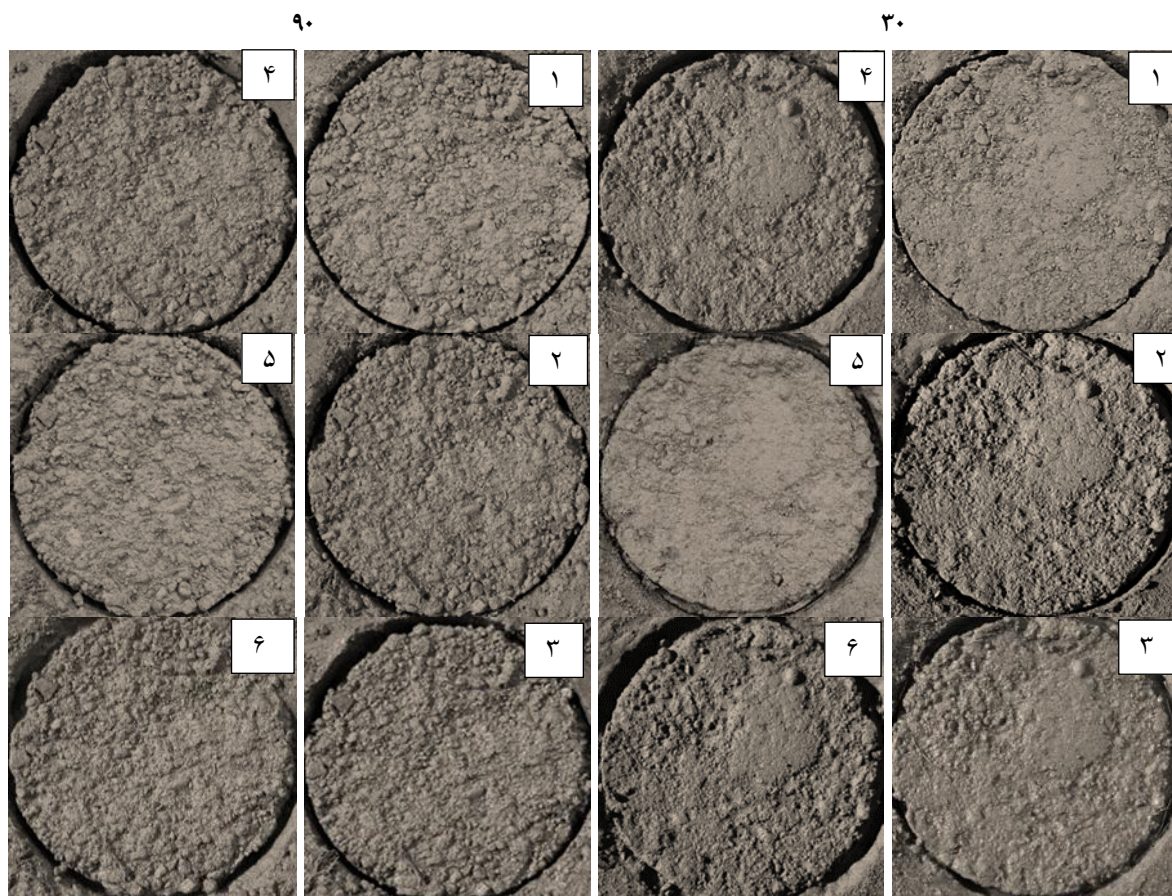
1. Shapiro-Wilk  
2. One-Way ANOVA

به سرعت کاهش پیدا کرده است؛ اما در شدت بارندگی ۹۰ میلی‌متر در ساعت بعد از توالی دوم این شیب نسبتاً کند مشاهده شد. همچنین با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۱ مقادیر میانگین پاشمان خالص و کل در شدت بارندگی ۳۰ میلی‌متر در ساعت طی توالی اول تا ششم نسبت به شدت بارندگی ۹۰ میلی‌متر در ساعت ۳ برابر بوده است که با یافته‌های صادقی و همکارانش [۲۱] مبنی بر درصد انتقال بیشتر ذرات پاشمان شده با دو نما، ذرات کوچک‌تر از ۱۰۰ میکرون و ذرات بزرگ‌تر از ۱۰۰ میکرون در شدت بارندگی ۳۰ میلی‌متر در ساعت نسبت به شدت بارندگی ۹۰ میلی‌متر در ساعت در شیب ۵ درصد نسبت به خاک مادری مطابقت داشت که در پژوهش حاضر نیز استفاده شده است. همچنین با توجه به توان کمتر باران در شدت بارندگی ۳۰ نسبت به ۹۰ میلی‌متر در ساعت می‌تواند ناشی از مدت دوام بیشتر RIIIE در شدت ۳۰ نسبت به ۹۰ میلی‌متر در ساعت و با لحاظ مقدار یکسان باران (۱۵ میلی‌متر) با توجه به دوام به ترتیب ۳۰ و ۱۰ دقیقه برای شدت بارندگی‌های یادشده باشد به گونه‌ای که در شدت ۹۰ میلی‌متر در ساعت به خصوص از توالی دوم به بعد عملاً سهم فرایند RIIIE در فرسایش کل بسیار ناچیز است و فرسایش بین شیاری با شروع رواناب آغاز می‌شود که با نتایج کیانی هرچگانی و همکارانش [۲۲] همخوانی دارد. مقادیر میانگین نسبت پاشمان بالادست/ پایین دست در شدت بارندگی ۳۰ و ۹۰ میلی‌متر در ساعت به ترتیب ۰/۸۷ و ۰/۹۶ به دست آمد که به طور کلی بیان کننده پاشمان بیشتر ذرات به سمت پایین دست نسبت به بالادست است، هر چند این نسبت در شدت بارندگی ۹۰ میلی‌متر در ساعت بزرگ‌تر و به عدد یک نزدیک است و حتی در برخی توالی‌ها این نسبت بزرگ‌تر از یک مشاهده شد که نشان دهنده غلبه توان باران بر نیروی گرانشی زمین در شدت بارندگی ۹۰ میلی‌متر در ساعت داشته باشد که با یافته‌های فو و همکارانش [۱۵] درباره افزایش نیروی قطرات باران از نیروی چسبندگی ذرات خاک و نیز نیروی گرانشی زمین برای جدایش ذرات خاک مطابقت داشت؛ اما با توجه به نتایج به دست آمده در جدول ۲ اختلاف معناداری ( $P > 0.05$ ) بین مقادیر میانگین پاشمان بالادست و پایین دست در دو شدت بارندگی ۳۰ و ۹۰ میلی‌متر در ساعت طی شش توالی رگبار مشاهده نشد.

افزایشی مقادیر میانگین پاشمان بالادست و پایین دست در شدت بارندگی ۳۰ میلی‌متر در ساعت تا توالی سوم و روند کاهشی بعد از آن را نشان می‌دهد؛ اما در شدت بارندگی ۹۰ میلی‌متر در ساعت مقادیر میانگین پاشمان بالادست و پایین دست تا توالی دوم روند افزایشی و بعد از آن روند کاهشی نشان داد. نتایج به دست آمده از نمودارهای شکل ۲ با تصاویر ارائه شده در شکل ۱ نیز همخوانی دارد به گونه‌ای که دقت در تصاویر ۱ تا ۶ در شدت بارندگی ۳۰ و ۹۰ میلی‌متر در ساعت نیز نشان دهنده شکست خاک دانه‌ها و نیز مشاهده رسوبات ریزتر در مقطع تصاویر حاصل از فنجان پاشمان به ترتیب تا توالی سوم و دوم است که با توجه به میزان ۵۵ درصد مقادیر لای و ۱۳ درصدی مقادیر رس در بافت خاک قابل توجه است و بعد از این توالی‌های رگبار، کوبیدگی و ایجاد سله بر اثر انرژی جنبشی قطرات باران که با نتایج پژوهش لی بیزونایس [۳۱] درباره فرایندهای حاصل از انرژی جنبشی قطرات باران و رخدادهای ایجاد شده در سطح خاک در سطح مقطع فنجان پاشمان همسو بود. همچنین ذرات درشت‌تر که انرژی جنبشی قطرات باران توانایی جابه‌جایی آنها را نداشتند قابل رؤیت است که با یافته‌های خالدی درویشان و شریفی مقدم [۲۰] درباره افزایش قطر خاک دانه و کاهش مقادیر مؤلفه‌ها به دلیل ناتوانی انرژی جنبشی قطرات باران در انتقال آنها همخوانی داشت. دقت در شکل ۲ و مقایسه سطح مقطع‌های فنجان پاشمان در شدت بارندگی ۳۰ و ۹۰ میلی‌متر در ساعت طی توالی رگبار نشان داد در شدت بارندگی ۹۰ میلی‌متر در ساعت به دلیل توان بیشتر باران با توان ۰/۵۴ وات بر مترمربع ذرات ریزتر بیشتر و سریع‌تر توسط انتقال پاشمانی منتقل شده که با نتایج کینل [۲] و صادقی و همکارانش [۲۱] در این باره مطابقت دارد و ذرات درشت‌تر نیز بیشتر در سطح مقطع قابل مشاهده هستند و در واقع نوعی فرسایش پاسنگی<sup>۱</sup> در مقیاس کوچک‌تر رخ داده است [۲۴].

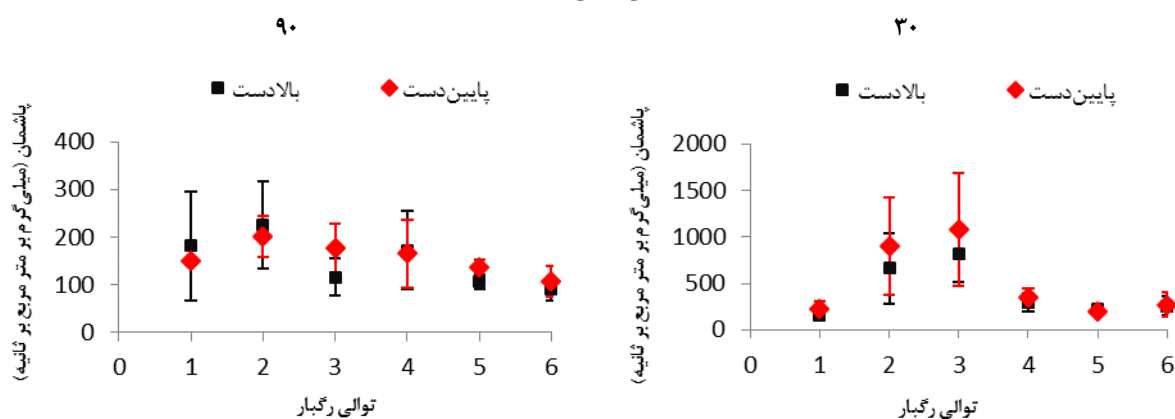
بدین منظور دقت در شکل ۲ و مقایسه نمودارهای مقادیر میانگین پاشمان بالادست و پایین دست در شدت بارندگی ۳۰ و ۹۰ میلی‌متر در ساعت نشان داد مقادیر میانگین پاشمان بالادست و پایین دست در شدت بارندگی ۳۰ میلی‌متر در ساعت بعد از توالی سوم با شیب تندی

شدت بارندگی (میلی‌متر در ساعت)



شکل ۱. تصاویر مقطع پاشمان‌شده در دو شدت بارندگی ۳۰ و ۹۰ میلی‌متر در ساعت طی توالی رگبار

شدت بارندگی (میلی‌متر در ساعت)



شکل ۲. الگوی تغییرات میانگین و انحراف معیار پاشمان بالادست و پایین‌دست در دو شدت بارندگی مختلف طی توالی رگبار

جدول ۱. مقادیر میانگین و ضریب تغییرات مؤلفه‌های RIIIE طی شش رگبار متوالی در شیب ۵ درصد و شدت‌های بارندگی ۳۰ و ۹۰ میلی‌متر در ساعت در شرایط آزمایشگاهی

۹۰			۳۰			شدت بارندگی (میلی‌متر در ساعت)
نسبت	پاشمان کل	پاشمان خالص	نسبت	پاشمان کل	پاشمان خالص	وقایع متوالی رگبار
بالادست/پایین دست			بالادست/پایین دست			
۱/۲۱	۳۲۹/۵۹	۷۲/۷۹	۰/۷۱	۳۸۷/۲۰	۶۷/۱۷	۱
۱/۱۲	۴۲۶/۵۶	۵۲/۱۱	۰/۷۴	۱۵۵۸/۷۷	۲۳۸/۵۶	۲
۰/۷۲	۲۹۲/۱۴	۶۴/۵۴	۰/۸۳	۱۸۹۲/۹۰	۲۸۳/۰۹	۳
۱/۰۸	۳۳۶/۴۴	۳۹/۲۰	۰/۸۹	۶۳۷/۸۵	۹۹/۳۸	۴
۰/۷۸	۲۴۰/۰۱	۲۹/۵۴	۱/۰۹	۴۲۰/۸۵	۲۶/۴۲	۵
۰/۸۷	۱۹۷/۰۳	۲۷/۱۸	۰/۹۶	۵۲۹/۳۷	۱۷/۹۳	۶
۰/۹۶	۳۰۳/۶۳	۴۷/۵۶	۰/۸۷	۹۰۴/۴۹	۱۲۲/۰۹	متوسط
۰/۲۱	۲۶/۵۱	۳۹/۴۰	۰/۱۶	۷۱/۹۶	۹۱/۹۵	ضریب تغییرات (درصد)

شدت بارندگی داشت. همچنین نسبت بالادست/پایین دست غیر از توالی پنجم در بقیه توالی‌های بارندگی نبود اختلاف معنادار ( $P > 0.05$ ) بین دو گروه شدت بارندگی مشاهده شد. دقت در نتایج جدول ۳ همچنین بیان‌کننده اختلاف معنادار ( $P \leq 0.05$ ) در توالی سوم، چهارم و پنجم مؤلفه‌های پاشمان بالادست، پاشمان پایین دست و پاشمان کل در دو شدت بارندگی داشت که با نتایج ارائه شده در شکل ۲ با توجه به تغییر شیب مقادیر پاشمان بالادست و پایین دست در شدت بارندگی ۳۰ و ۹۰ میلی‌متر در ساعت از توالی سوم به بعد نیز همخوانی دارد به گونه‌ای که از توالی اول تا توالی سوم بارندگی با توجه به توان باران‌های یاد شده و شکست خاک‌دانه و انتقال ذرات پاشمان شده بر اثر انرژی قطرات باران روند انتقال به صورت افزایشی است و بعد از آن به دلیل درشت‌تر شدن ذرات رسوب به جامانده و نبود ذرات قابل انتقال با توجه به انرژی جنبشی قطرات باران [۲۱]، روند انتقال کاهش یافته با شیب‌های متفاوت (شیب تند در شدت ۳۰ میلی‌متر در ساعت و شیب نسبتاً ملایم در شدت ۹۰ میلی‌متر در ساعت) مشاهده شد که سبب اختلاف معنادار ( $P \leq 0.05$ ) در توالی سوم تا پنجم شده است.

در نهایت مقایسه مقادیر ضریب تغییرات پاشمان خالص و کل در دو شدت بارندگی ارائه شده طی شش رگبار متوالی در جدول ۱ نشان داد ضریب تغییرات مؤلفه‌های یاد شده در شدت بارندگی ۳۰ میلی‌متر در ساعت حدود ۲/۵ برابر بیشتر از شدت بارندگی ۹۰ میلی‌متر در ساعت طی شش رگبار متوالی است. دقت در داده‌های جدول ۱ و مقادیر متوسط مؤلفه‌های یاد شده شیب تند کاهشی در مقادیر آنها در شدت بارندگی ۳۰ میلی‌متر در ساعت از توالی سوم رگبار به بعد نسبت به شدت بارندگی ۹۰ میلی‌متر در ساعت را نشان می‌دهد که سبب ایجاد انحراف معیار بزرگ‌تر و در نتیجه ضریب تغییرات بزرگ‌تر شده است.

نتایج مقایسه‌ای مؤلفه‌های در RIIIE (پاشمان بالادست، پاشمان پایین دست، پاشمان کل، پاشمان خالص و نسبت پاشمان بالادست/پایین دست) در دو گروه مستقل شدت بارندگی ۳۰ و شدت بارندگی ۹۰ میلی‌متر در ساعت طی شش رگبار متوالی با استفاده از آزمون تحلیل واریانس یک‌طرفه در جدول ۳ ارائه شده است که دقت در نتایج جدول ۳ به‌طور کلی نشان‌دهنده نبود اختلاف معنادار در پاشمان خالص ( $P > 0.05$ ) در شش توالی در دو گروه

جدول ۲. نتایج مقایسه‌ای پاشمان بالادست با پایین‌دست طی شش رگبار متوالی در شیب ۵ درصد و شدت‌های بارندگی ۳۰ و ۹۰ میلی‌متر در ساعت با استفاده از آزمون تحلیل واریانس یک‌طرفه

۹۰		۳۰		شدت بارندگی (میلی‌متر بر ساعت)	
سطح معناداری	آماره F	سطح معناداری	آماره F	وقایع متوالی رگبار	
۰/۶۵	۰/۲۳	۰/۲۷	۱/۶۱	۱	
۰/۶۹	۰/۱۸	۰/۵۶	۰/۴۱	۲	
۰/۱۷	۲/۸۳	۰/۵۳	۰/۴۵	۳	
۰/۹۲	۰/۰۱۱	۰/۵۳	۰/۴۵	۴	
۰/۰۹	۴/۹۲	۰/۴۹	۰/۵۵	۵	
۰/۴۹	۰/۵۶	۰/۸۹	۰/۰۲۲	۶	

جدول ۳ نتایج مقایسه‌ای مؤلفه‌های RIIIE در شدت‌های بارندگی ۳۰ با ۹۰ میلی‌متر در ساعت طی شش رگبار متوالی با استفاده از آزمون تحلیل واریانس یک‌طرفه

نسبت بالادست/پایین‌دست		پاشمان کل		پاشمان خالص		پاشمان پایین‌دست		پاشمان بالادست		وقایع متوالی رگبار
سطح معناداری	آماره F	سطح معناداری	آماره F	سطح معناداری	آماره F	سطح معناداری	آماره F	سطح معناداری	آماره F	
۰/۳۳	۱/۲۴	۰/۵۹	۰/۳۳	۰/۹۱	۰/۰۱	۰/۱۵	۳/۰۴	۰/۷۸	۰/۰۸	۱
۰/۱۵	۳/۲۰	۰/۰۹	۴/۷۸	۰/۲۰	۲/۲۸	۰/۰۸	۵/۲۵	۰/۱۲	۳/۸۱	۲
۰/۶۴	۰/۲۵	۰/۰۴	۹/۳۸	۰/۳۱	۱/۳۷	۰/۰۵	۶/۴۷	۰/۰۱	۱۵/۹۶	۳
۰/۵۸	۰/۳۵	۰/۰۵	۷/۵۷	۰/۴۶	۰/۸۰	۰/۰۵	۶/۳۹	۰/۱۷	۲/۷۷	۴
۰/۰۴	۹/۵۴	۰/۰۱	۲۶/۵۷	۰/۸۵	۰/۰۴	۰/۰۱	۲۵/۴۳	۰/۰۱	۲۰/۳۹	۵
۰/۵۶	۰/۳۹	۰/۰۷	۵/۸۸	۰/۶۴	۰/۲۶	۰/۱۰	۴/۵۳	۰/۰۶	۷/۵۶	۶

### نتیجه‌گیری

ساعت در شرایط آزمایشگاهی برنامه‌ریزی و انجام شد. یافته‌های تحقیق نشان داد بین مقادیر میانگین پاشمان بالادست و پایین‌دست در شدت‌های ۳۰ و ۹۰ میلی‌متر در ساعت بارندگی در شیب ۵ درصد اختلاف معناداری ( $P > 0.05$ ) وجود ندارد. همچنین بررسی الگوی تغییرات مقادیر میانگین پاشمان بالادست و پایین‌دست در شدت بارندگی ۳۰ میلی‌متر در ساعت تا توالی سوم بارندگی روند افزایشی با شیب تند و سپس کاهش داشت در صورتی که در شدت بارندگی ۹۰ میلی‌متر در ساعت تا توالی دوم روند افزایشی با شیب کند و سپس کاهش داشت و در نهایت مقایسه مؤلفه‌های پاشمان بالادست، پایین‌دست، کل، خالص

افزایش مطالعه و درک بیشتر فرایندهای فرسایش خاک سبب بهبود فهم فرسایش خاک و تولید رسوب و در نهایت مدل‌سازی فرسایش و انتقال رسوب خواهد شد و از آنجا که جدایش و انتقال ذرات رسوبی ناشی از پاشمان به‌عنوان آغازین مراحل فرایند فرسایش آبی محسوب می‌شود، می‌تواند بسیار مهم و حائز اهمیت در فهم و تحلیل‌ها رخدادهای مراحل بعدی فرایند فرسایش خاک باشد. بنابراین، تحقیق حاضر با هدف بررسی اثر شش رگبار متوالی بر مؤلفه‌های فرسایش ناشی از اثر قطرات باران (RIIE) طی شدت‌های بارندگی ۳۰ و ۹۰ میلی‌متر در



- meeting, Purdue University, USDA-ARS national soil erosion research laboratory. 1999; May.
- [11]. Barry DA, Sander GC, Jomaa S, Heng BCP, Parlange JY, Lisle IG, Hogarth WL. Exact solutions of the Hairsine-Rose precipitation-driven erosion model for a uniform grain size soil. *J. Hydrol.* 2010; 389 (3-4): 399-405.
- [12]. Parsons AJ, Lascelles B. Rainfall simulation in geomorphology. *Earth Surf. Process. Land.* 2000; 25(7): 679-689.
- [13]. Legout C, Leguédou S, Le Bissonnais Y, Malam Issa O. Splash distance and size distributions for various soils. *Geoderma.* 2005; 124: 279-292.
- [14]. Goebes P, Seitz S, Geißler C, Lassu T, Peters P, Seeger M, Nadrowski, K. Scholten T. Momentum or kinetic energy – How do substrate properties influence the calculation of rainfall erosivity? *J. Hydrol.* 2014; 517: 310-316.
- [15]. Fu S, Liu B, Liu H, Xu L. The effects of slope on interrill erosion at short slopes. *Catena.* 2011; 84: 29-34.
- [16]. Ma RM, Li ZX, Cai CF, Wang JG. The dynamic response of splash erosion to aggregate mechanical breakdown through rainfall simulation events in Ultisols (subtropical China). *Catena.* 2014; 121: 279-287.
- [17]. Khalili Moghadam B, Jabarifar M, Bagheri M, Shahbazi E. Effects of land use change on soil splash erosion in the semi-arid region of Iran. *Geoderma.* 2015; 241-242: 210-220.
- [18]. Saedi T, Shorafa M, Gorji M, Khalili Moghadam B. Indirect and direct effects of soil properties on soil splash erosion rate in calcareous soils of the central Zagross, Iran: A laboratory study. *Geoderma.* 2016; 271: 1-9.
- [19]. Yusefi A, Farrokhian Firouzi A, Khalili Moghadam B. Evaluation of temporal variation of splash erosion in different slopes and agricultural and forest land uses. *J. Soil Water Resour. Conserv.* 2014; 3(3): 11-20. (In Persian)
- [20]. Khaledi Darvishan A, Sharifi Moghadam E. Effects of aggregate diameter on soil splash under laboratorial conditions. *Iran-Water. Manag. Sci. Eng.* 2016; 10(32): 33-38. (In Persian)
- [21]. 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.
- و نسبت پاشمان بالادست/ پایین دست در دو شدت بارندگی ۳۰ با ۹۰ میلی متر در ساعت در شش توالی رگبار به طور کلی نبود اختلاف معنادار در پاشمان خالص و نسبت بالادست/ پایین دست ( $P > 0.05$ ) و وجود اختلاف معنادار در توالی سوم، چهارم و پنجم برای پاشمان بالادست، پایین دست و کل را نشان می داد. در مجموع می توان نتیجه گیری کرد که تحت شرایط آزمایشگاهی مطالعه شده، مؤلفه های فرسایش ناشی از اثر قطرات باران تحت تأثیر رگبارهای متوالی باران، رفتارهای پیچیده و متفاوتی در دو شدت بارندگی ۳۰ و ۹۰ میلی متر در ساعت داشتند. در ضمن برای ارائه جمع بندی جامع و کامل به انجام مطالعات جامع و طولانی تر تحت شرایط شیبها و شدت های مختلف بارندگی و مقیاس های مکانی و زمانی مختلف نیاز است.

#### منابع

- [1]. Terry JP. A rain splash component analysis to define mechanisms of soil detachment and transportation. *Aust. J. Soil Res.* 1998; 36: 525-542.
- [2]. Kinnell PIA. Raindrop impact induced erosion processes and prediction: A review. *Hydrol. Process.* 2005; 19: 2815-2844.
- [3]. Kinnell PIA. The influence of raindrop induced saltation on particle size distributions in sediment discharged by rain-impacted flow on planar surfaces. *Catena.* 2009; 78(1): 2-11.
- [4]. Kinnell, PIA. A review of the design and operation of runoff and soil loss plots. *Catena.* 2016; 145, 257-265.
- [5]. Ellison WD. Studies of raindrop erosion. *Agri. Eng.* 1944; 25 (4): 131-136.
- [6]. Ekern PC. Raindrop impact as a force initiating soil erosion. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 1950; 15: 7-10.
- [7]. Morgan RPC. Field studies of rainsplash erosion. *Earth Surf. Process.* 1978; 3: 295-299.
- [8]. Bryan RB. The influence of slope angle on soil entrainment by sheetwash and rainsplash. *Earth Surf. Process.* 1979; 4: 43-58.
- [9]. Torri D, Poesen J. The effect of soil surface slope on raindrop detachment. *Catena.* 1992; 19: 561-578.
- [10]. Fan JC, Wu MF. Effects of soil strength, texture, slope steepness and rainfall intensity on interrill erosion of some soils in Taiwan. In <sup>10th</sup> International Soil Conservation Organization

- [22]. 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). *J. Water Soil Res.* 2016; 46 (4): 631-640. (In Persian)
- [23]. 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. (In Persian)
- [24]. Mahdavi M. *Applied Hydrology*, Tehran University Press. 2002; 2: 437. (In Persian)
- [25]. Abdollahi Z, Sadeghi SHR, Khaledi Darvishan A. Variation of simulated rainfall characteristics by permuting intake discharge and water pressure. *Iran. Water. Manag. Sci. Eng.* 2016; 10(34): 51-62. (In Persian)
- [26]. Khaledi Darvishan A, Sadeghi SHR, Homae M, Arabkhedri M. Measuring sheet erosion using synthetic colorcontrast aggregates. *Hydrol. Process.* 2014; 28(15): 4463-4471.
- [27]. Kiani Harchegani M, Sadeghi SHR, Asadi H. Inter-storm variability of coefficient of variation of runoff volume and soil loss during rainfall and erosion simulation replicates, *J. Ecohydrol.* 2017; 4(1): 191-199. (In Persian)
- [28]. Agassi M, Bradford JM. Methodologies for interrill soil erosion studies. *Soil Till. Res.* 1999; 49:277-287.
- [29]. 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.
- [30]. Bayazidi A, Oladi B, Abbasi N. Data analysis by SPSS (PASW) 18 software. Abed Publication. 2009; 1: 250 p. (In Persian)
- [31]. Le Bissonnais Y. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. *Euro. J. Soil Sci.* 1996. 47: 425-437.