

## اثر شدت باران بر انتخاب پذیری ذرات پاشمان یافته در خاک های منطقه نیمه خشک

مجید فرومدی<sup>۱\*</sup>، علی رضا واعظی<sup>۲</sup>، جعفر نیکبخت<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸-۰۱-۲۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸-۰۶-۱۳ تاریخ چاپ: ۱۳۹۹-۰۲-۲۲

### چکیده

فرسایش پاشمانی نخستین نوع فرسایش آبی است که توسط ضربه قطرات باران بر سطح خاک ایجاد می شود. قطرات باران می توانند ذرات خاک را از جا کنده و جابه جا کنند. انتقال ذرات در اثر پاشمان قطرات به عوامل متعددی از جمله نوع خاک و شدت باران بستگی دارد. اگرچه اطلاعاتی در مورد نقش این دو عامل در فرسایش پاشمانی در دسترس است اما انتخاب پذیری ذرات در فرسایش پاشمانی موضوعی ناشناخته می باشد. این پژوهش به منظور بررسی تغییرات فرسایش پاشمانی و انتخاب پذیری ذرات در خاک های مختلف تحت تأثیر شدت باران انجام گرفت. برای این منظور آزمایش در سه خاک با بافت مختلف (لوم، لومرسی و لومرسی شنی) در سه شدت باران (۱۰، ۲۰ و ۳۰ میلی متر بر ساعت) تحت شیب ثابت ۱۰ درصد در سه تکرار در مجموع با ۲۷ واحد آزمایشی در قالب طرح کاملاً تصادفی انجام شد. بر اساس نتایج بیشترین مقدار فرسایش پاشمانی در خاک لومرسی (۸۰/۴۵ گرم بر متر مربع در دقیقه) و کمترین مقدار در خاک لومرسی شنی (۶۲/۱۹ گرم بر متر مربع در دقیقه) بود. با افزایش شدت باران، شدت فرسایش پاشمانی افزایش یافت. به طور کلی انتخاب پذیری ذرات در فرسایش پاشمانی تحت تأثیر بافت خاک، شدت باران و برهم کنش آن دو قرار گرفت. ذرات شن، سیلت و رس به ترتیب ۳/۲۳، ۵۹/۷۰ و ۳۷/۰۷ درصد از سهم ذرات پاشمان یافته را شامل شدند. در تمامی بافت ها (به جز بافت لوم) انتخاب پذیری ذرات سیلت در سطوح مختلف شدت باران بیش تر از سایر ذرات بود. در خاک لوم انتخاب پذیری ذرات رس بیش تر از ذرات سیلت بود که علت این موضوع پایین بودن مقدار ذرات رس در نمونه اولیه خاک لوم بود.

**واژه های کلیدی:** تخریب خاکدانه، توزیع اندازه ذرات، شبیه ساز باران، ضربه قطرات باران

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری؛ گروه علوم خاک؛ دانشکده کشاورزی؛ دانشگاه زنجان؛ زنجان

<sup>۲</sup> استاد؛ گروه علوم خاک؛ دانشکده کشاورزی؛ دانشگاه زنجان؛ زنجان

<sup>۳</sup> دانشیار، گروه مهندسی آب؛ دانشکده کشاورزی؛ دانشگاه زنجان؛ زنجان

\* نویسنده مسئول: Majid.foroumadi89@gmail.com

## مقدمه

یکی از مهم‌ترین اثرات برخورد قطرات باران بر سطح خاک، تخریب خاک‌دانه‌ها می‌باشد. پایداری خاک‌دانه که مقاومت ذرات خاک را در برابر جدا شدن نشان می‌دهد، در شدت تخریب خاک‌دانه در اثر ضربه قطرات باران نقش مهمی دارد (رفاهی، ۱۳۸۵). پایداری اندک خاک‌دانه‌ها منجر به تخریب آسان آن‌ها، تراکم خاک، ایجاد سله، کاهش نفوذپذیری آب به خاک، افزایش رواناب و فرسایش خاک می‌شود (استینر و ویلیامز، ۱۹۹۶). پاشمان ذرات به عنوان پیامد دیگر برخورد قطرات باران بر سطح خاک است. هنگامی که قطره باران به سطح خاک برخورد می‌کند، اولین مرحله فرسایش یعنی جداسازی ذرات خاک شروع می‌شود. در ادامه به دلیل خیس شدن ذرات و کاهش چسبندگی آن‌ها، جدا شدن ذرات به وسیله قطرات باران آسان می‌شود (بافکار و مجردی، ۱۳۸۵). فرآیند پرتاب ذرات خاک به پیرامون، بر اثر برخورد قطرات باران به سطح خاک، پاشمان ذرات خاک نامیده می‌شود که منجر به تراکم و کاهش نفوذپذیری خاک می‌شود.

عوامل زیادی مقدار پاشمان و نوع مواد منتقله را تحت تأثیر قرار می‌دهند. بافت خاک از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر فرسایش پاشمانی و تولید رسوب است. مطالعات نشان داده است که خاک‌های با بافت ریز دارای چسبندگی زیادی بوده و در نتیجه جدا شدن ذرات آن‌ها مشکل است؛ با این وجود رسوبات حاصل از آن‌ها به راحتی منتقل می‌شوند و در مقابل در خاک‌های درشت‌بافت، ذرات سریع‌تر و راحت‌تر جدا می‌شوند و در عین حال رسوبات تشکیل شده، به سختی منتقل و رواناب کم‌تری نسبت به خاک‌های ریزبافت تولید می‌کنند (واعظی، ۲۰۱۴؛ ژائو و همکاران، ۲۰۱۴). گزارش‌ها نشان می‌دهد بین مقدار سیلت یک خاک و فرسایش‌پذیری آن ارتباط نزدیکی وجود دارد. هر چه مقدار سیلت خاک بیش‌تر باشد، فرسایش‌پذیری آن افزایش می‌یابد. به‌طور کلی ذرات سیلت و شن بسیار ریز (ذراتی بین ۲۰۰-۲ میکرون)، فرسایش‌پذیری بالایی دارند (حسن‌زاده و همکاران، ۱۳۹۲). عوامل فرساینده نیز به نوبه خود در تعیین نوع ماده منتقله مؤثر می‌باشد. شدت و انرژی جنبشی باران نیز از جمله عوامل اصلی هدررفت خاک می‌باشد. فرآیندهای فرسایش خاک عامل دیگر تعیین‌کننده دانه‌بندی مواد رسوب یافته هستند (والینگ، ۱۹۸۸).

توزیع اندازه ذرات پاشمان یافته، هم به خصوصیات خاک در مرحله شکستن خاک‌دانه‌ها و هم به خصوصیات بارندگی مخصوصاً انرژی جنبشی قطرات باران در مرحله انتقال و شیب دامنه وابسته می‌باشد. مطالعات زیادی در زمینه خاک‌دانه‌های خاک به عنوان یک عامل بسیار مهم و تأثیرگذار در خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک (هانگ و همکاران، ۲۰۱۰؛ فالسون و همکاران، ۲۰۱۲) و هم‌چنین مؤثر در انتخاب اندازه ذرات پاشمان شده توسط قطرات باران (ورمانگ و همکاران، ۲۰۰۹) صورت پذیرفته است. در همین راستا برخی مطالعات به بررسی انتقال انتخابی ذرات اولیه یا خاک‌دانه‌های پاشمان شده نسبت به نمونه خاک‌دانه‌های با اندازه مشخص پرداختند از جمله چنگ و همکاران (۲۰۰۸) مقدار فرسایش پاشمانی را در چهار نوع خاک با استفاده از فنجان پاشمان مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد خاک‌دانه‌های دارای محتوای ماده آلی زیاد کم‌ترین مقدار فرسایش پاشمانی را دارند. ما و همکاران (۲۰۱۴) به بررسی ارتباط بین پایداری خاک‌دانه‌ها و اندازه ذرات پاشمان شده در چهار نوع خاک در شدت بارش حدود ۶۰ میلی‌متر بر ساعت پرداختند. نتایج نشان داد که ذرات پاشمان شده در دامنه ۰/۲۵ تا ۰/۵ و ۰/۵ تا یک میلی‌متر قرار داشتند. یائو و همکاران (۲۰۱۸) در پژوهشی به بررسی اثر پوشش گیاهی و شدت باران بر فرسایش پاشمانی در چین پرداختند. نتایج نشان داد که پوشش گیاهی نقش بسیار مهمی در مقدار فرسایش پاشمانی ایفاء می‌کند و همبستگی منفی معنی‌داری ( $P < 0/01$ ) با فرسایش پاشمانی داشت. هم‌چنین شدت باران نیز اثر معنی‌داری ( $P < 0/01$ ) بر مقدار فرسایش پاشمانی داشت. کیانی‌هرچگانی و صادقی (۱۳۹۶) در پژوهشی به بررسی اثر رگبارهای متوالی بر مؤلفه‌های فرسایش پاشمانی طی دو شدت مختلف بارندگی (۳۰ و ۹۰ میلی‌متر بر ساعت) در شرایط آزمایشگاهی پرداختند. نتایج نشان داد که مؤلفه‌های پاشمان بالادست با پایین‌دست در شدت بارندگی ۳۰ و هم‌چنین در شدت بارندگی ۹۰ میلی‌متر بر ساعت در توالی‌های مختلف اختلاف معنی‌دار نداشتند.

شیب‌های مختلف و تعامل آن‌ها دارای اختلاف معنی‌دار ( $P < 0.05$ ) بودند.

فرسایش ناشی از قطرات باران از شکل‌های مهم فرسایش خاک در مناطق خشک و نیمه‌خشک است. در این مناطق دوره‌های طولانی‌مدت خشکی مانع از استقرار و حفظ پوشش گیاهی می‌شود. از سوی دیگر خاک‌های واقع در مناطق خشک و نیمه‌خشک اغلب کم‌عمق، با مواد آلی کم و ساختمان ضعیف می‌باشند. با بررسی مطالعات انجام شده در این زمینه می‌توان این‌گونه جمع‌بندی نمود که هر چند تحقیقات کلی در مورد نقش درجه شیب یا شدت باران بر میزان فرسایش پاشمانی مورد توجه محققین مختلف قرار گرفته، لیکن انتقال‌پذیری و انتخاب‌پذیری هر یک از ذرات اولیه یا حساسیت آن‌ها در مقابل انتقال به وسیله فرسایش پاشمانی موضوعی است که به دقت شناخته نشده است. از این رو در این پژوهش نقش شدت باران بر میزان فرسایش پاشمانی و نیز انتخاب‌پذیری ذرات اولیه تحت تأثیر شدت باران در سه بافت منطقه نیمه‌خشک در شمال غرب کشور مورد بررسی قرار گرفت.

## مواد و روش‌ها

### طرح آزمایشی

این پژوهش در سه خاک با بافت مختلف (لوم، لومرسی و لومرس‌شنی) در سه شدت باران (۱۰، ۲۰ و ۳۰ میلی‌متر بر ساعت) تحت شیب ثابت ۱۰ درصد در سه تکرار در مجموع با ۲۷ واحد آزمایشی در قالب طرح کاملاً تصادفی انجام شد. برای انتخاب شدت و مدت مناسب بارندگی، از تحلیل‌های انجام گرفته روی ۱۹۶۱ رخداد باران ثبت شده در ایستگاه باران‌نگاری قلتوق واقع در غرب زنجان طی سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۰ استفاده شد (بشارت و واعظی، ۱۳۹۴). بر این اساس شدت بارندگی در منطقه از شدت حدود یک میلی‌متر بر ساعت تا شدت ۱۵۰ میلی‌متر بر ساعت تغییر می‌کند و تداوم آن‌ها بین پنج دقیقه تا بیش از سه ساعت می‌باشد (شکل ۱). باران‌های رایج در منطقه دارای شدتی حدود ۳۰ میلی‌متر بر ساعت (با حدود ۲۶ درصد فراوانی) با مدت بین ۷/۵ و ۱۵ دقیقه (با حدود ۳۲ درصد فراوانی) می‌باشند. خاک‌های مورد مطالعه در این پژوهش از مناطق مختلف استان زنجان شناسایی شد. این منطقه در ارتفاع ۱۳۲۹ متری از سطح دریا با طول جغرافیایی  $35^{\circ} 5' E$  و عرض جغرافیایی  $39^{\circ} 57' N$

همچنین نتایج آن‌ها بیان‌کننده افزایش ۲/۵ برابری تغییرات پاشمان خالص و کل در شدت بارندگی ۳۰ میلی‌متر بر ساعت نسبت به ۹۰ میلی‌متر بر ساعت بود. بلیانی و واعظی (۱۳۹۶) در پژوهشی به بررسی فرسایش پاشمانی در ارتباط با شدت باران و محتوای رطوبت پیشین خاک در بافت‌های مختلف خاک با استفاده از باران شبیه‌سازی شده پرداختند. نتایج نشان داد تفاوت‌های معنی‌دار بین بافت‌های خاک، سطوح محتوای رطوبت پیشین و شدت باران ( $P < 0.001$ ) وجود دارد. هنریخس و حیوای (۱۳۹۶) در پژوهشی به مطالعه آزمایشگاهی فرسایش پاشمانی در بافت‌های مختلف خاک با استفاده از شبیه‌ساز باران پرداختند. نتایج نشان داد که بین شدت پاشمان در کلاس‌های بافتی در شدت‌های ۶۵ و ۱۲۰ میلی‌متر بر ساعت تفاوت معنی‌دار وجود داشت. غلامی و کریمی (۱۳۹۷) در پژوهشی به بررسی اثر مدت بارندگی و رطوبت خاک بر تغییرات پاشمان خاک پرداختند. نتایج نشان داد که متغیرهای مدت بارندگی و رطوبت پیشین خاک بر مقادیر پاشمان کل و خالص معنی‌دار بود ( $P < 0.01$ ).

در زمینه انتخاب‌پذیری و انتقال‌پذیری ذرات پاشمان یافته مطالعاتی توسط محققین مختلف داخلی نیز صورت گرفته است. کیانی‌هرچگانی و همکاران (۱۳۹۴) در پژوهشی به تحلیل مقایسه‌ای اثر شدت باران (۳۰، ۶۰ و ۹۰ میلی‌متر بر ساعت) و شیب (۵، ۱۵ و ۲۵ درصد) پلات‌های آزمایشگاهی بر مؤلفه‌های فرسایش ناشی از اثر قطره‌های باران پرداختند. نتایج نشان داد که تأثیرپذیری تمامی متغیرهای مورد بررسی شامل پاشمان بالادست و پایین‌دست و پاشمان کل و خالص ناشی از شدت باران و تغییرات مکانی در سطح ۹۹ درصد معنی‌دار بود و تنها تأثیر تغییرات مکانی بر پاشمان خالص معنی‌دار نبود. صادقی و همکاران (۱۳۹۵) در پژوهشی به بررسی توزیع اندازه ذرات پاشمان در طول فلول آزمایشگاهی تحت تأثیر شیب‌ها (۵، ۱۵ و ۲۵ درصد) و شدت‌های مختلف بارندگی (۳۰، ۶۰ و ۹۰ میلی‌متر بر ساعت) پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که شدت‌های مختلف بارندگی تأثیر معنی‌داری بر همه مؤلفه‌ها غیر از ذرات کوچک‌تر از دو میکرون و چولگی ذرات رسوب در بالادست فنبان پاشمان داشت؛ اما در پایین‌دست فنبان پاشمان همه مؤلفه‌ها غیر از  $D_{10}$ ، جورشدگی و کشیدگی ذرات رسوبی نسبت به شدت‌های مختلف بارندگی،

آزمایش‌های معمول فیزیکی و شیمیایی تهیه و به آزمایشگاه منتقل شد.

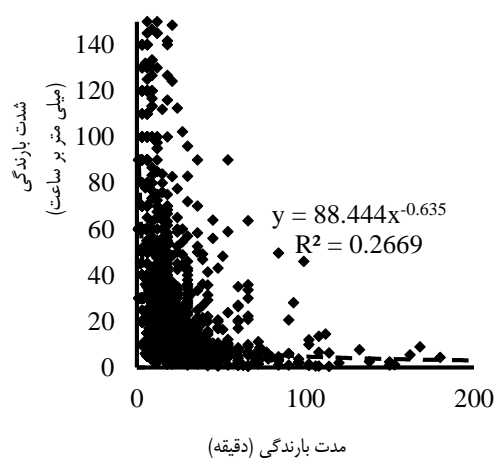
### تعیین ویژگی‌های خاک

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک شامل توزیع اندازه ذرات (PSD) به روش هیدرومتری تعیین شد (بایکاس، ۱۹۶۲). فراوانی ذرات بر اساس روش دانه‌بندی آمریکایی (سازمان کشاورزی ایالات متحده، ۱۹۷۲) تعیین شد. چگالی ظاهری در نمونه خاک برداشت شده به وسیله سیلندر فلزی با قطر داخلی پنج سانتی‌متر و ارتفاع ۴/۹ سانتی‌متر تعیین شد (بلیک و هارتگ، ۱۹۸۶). میانگین وزنی قطر خاک‌دانه (MWD) پایدار در آب بر اساس مقاومت خاک‌دانه‌ها در آب به روش الکترون (Goh et al., 1993) در خاک‌دانه‌هایی با قطر کوچک‌تر از شش میلی‌متر با استفاده از دستگاه مکانیکی با نوسان ۳۰ دور در دقیقه به مدت یک دقیقه (حسن‌زاده و همکاران، ۱۳۹۲)، متوسط اندازه خاک‌دانه با جداسازی خاک‌دانه‌ها به وسیله سری الک‌ها (کمپر روزنا، ۱۹۸۶)، هدایت هیدرولیکی اشباع به روش بار ثابت (Page, 1982)، درصد ماده آلی به روش والکلی-بلک (والکلی و بلک، ۱۹۴۷)، درصد کربنات کلسیم معادل به روش خنثی‌سازی با اسید کلریدریک (ارسکین و همکاران، ۲۰۰۲) و درصد سدیم تبادل‌پذیر خاک (ESP) نیز به روش استات آمونیوم (کلوت، ۱۹۸۶) تعیین شدند.

### شبیه‌سازی باران

شبیه‌سازهای باران ابزارهای مناسبی برای بررسی تغییرات خاک تحت فرآیند فرسایش و هم‌چنین ارزیابی شرایط محیطی مانند شیب زمین، رطوبت اولیه خاک و شدت باران از نظر فرسایش خاک می‌باشند (اسدی و همکاران، ۲۰۱۱). در این پژوهش از یک دستگاه شبیه‌ساز باران متحرک با چارچوب فلزی با صفحه بارشی به طول ۱۲۰ و به عرض ۷۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۲۲۰ سانتی‌متر استفاده شد (شکل ۲). دستگاه شبیه‌ساز باران با تجهیز به دستگاه الکتروموتور دارای قابلیت نوسان ۲۰ دور در دقیقه و به فاصله پنج سانتی‌متر نوسان خطی داشت. صفحه بارش باران‌ساز از ۴۸۰ قطعه نازل قطره‌ساز تشکیل شده بود. نازل‌ها به فاصله سه سانتی‌متری از هم برای ایجاد بارش یکنواخت باران قرار گرفتند. نازل‌ها توانایی تولید قطراتی با قطر ۲/۱ میلی‌متر را داشتند. قطر قطرات باران شبیه‌سازی

۳۶۰ قرار دارد. میانگین بارندگی سالانه ۳۱۵ میلی‌متر و اقلیم منطقه به روش دمارتن، نیمه‌خشک می‌باشد. از نظر زمین‌شناسی این منطقه بر روی رسوبات کواترنری واقع شده است (عبدی‌نژاد و همکاران، ۱۳۹۳). خاک منطقه به شدت تحت تأثیر فرسایش پاشمانی است و سله که از پیامدهای این نوع فرسایش می‌باشد، سرتاسر سطح آن را در بر گرفته است. در بسیاری از زمین‌های شیب‌دار فرسایش شیاری و خندقی نیز به چشم می‌خورد. این منطقه یکی از منابع مهم تولید رسوب در حوزه آبخیز سفیدرود می‌باشد (واعظی و قره‌داغلی، ۱۳۹۲).



شکل ۱- منحنی شدت-مدت باران‌ها در ایستگاه قلتوق زنجان برای سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۰ (بشارت و واعظی، ۱۳۹۴).

### نمونه‌برداری خاک

نمونه‌های خاک از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری برداشت و با الک هشت میلی‌متری غربال شدند (فرومدی و واعظی، ۱۳۹۶). علت عبور خاک از الک هشت میلی‌متری شباهت نمونه‌های عبور داده شده از این الک با خاک طبیعی است. انتخاب عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متر بر اساس مشاهده انتقال ذرات ریز و تشکیل بافت درشت و سنگی در خاک‌ها بود چرا که خاک زیرسطحی تحت فرآیندهای فرسایشی نمی‌تواند قرار بگیرد. در نمونه خاک گذرانده از الک، ذرات اولیه (سنگریزه) به صورت دستی برداشت شدند و تنها خاک‌دانه‌های با قطر کوچک‌تر از هشت میلی‌متر برای انجام آزمایش‌های فرسایش مورد استفاده قرار گرفتند. مقداری خاک عبور داده شده از الک دو میلی‌متر نیز برای انجام

کوچکی به منظور زهکشی آب نفوذ یافته در خاک تعبیه شده بود (مورگان، ۱۹۷۸). برای جلوگیری از خارج شدن خاک از منافذ فنجان، قبل از پر کردن ظروف یک قطعه پارچه توری و منفذدار در انتهای آن قرار داده شد. فنجان‌های پاشمان محتوی خاک‌های مختلف تحت باران شبیه‌سازی شده با شدت‌های ۱۰ تا ۳۰ میلی‌متر بر ساعت به مدت ۳۵ دقیقه قرار گرفتند. فنجان‌های پاشمان درون ظرف‌های پلاستیکی به قطر ۲۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۳۵ سانتی‌متر قرار داده شدند. ذرات پاشمان یافته از فنجان‌های پاشمان در داخل ظرف‌های پلاستیکی جمع‌آوری و جرم کل ذرات پاشمان یافته پس از خشک شدن در آون در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس اندازه‌گیری شدند (شکل ۳ ب). شدت فرسایش پاشمانی بر اساس جرم خاک پاشمان یافته در واحد سطح فنجان پاشمان و واحد زمان به دست آمد.

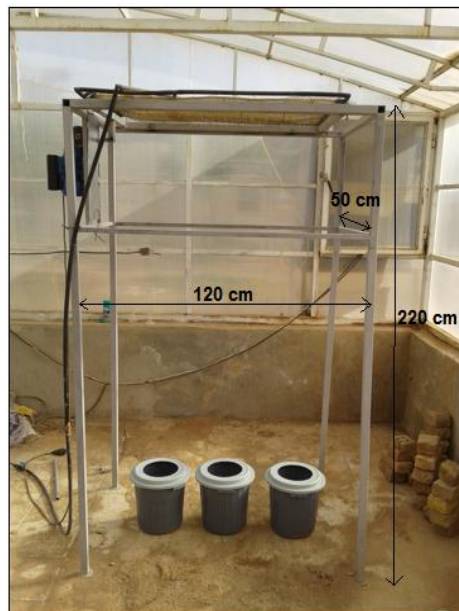
### تعیین انتخاب‌پذیری ذرات پاشمان یافته

برای محاسبه انتخاب‌پذیری ذرات پاشمان یافته ابتدا توزیع اندازه ذرات پاشمان یافته به روش هیدرومتری تعیین شد (بایکاس، ۱۹۶۲). پس از جمع‌آوری کل ذرات پاشمان یافته، ابتدا ذرات شن با استفاده از الک ۰/۰۵ میلی‌متری جدا شدند. سپس درصد ذرات سیلت و رس نیز به وسیله هیدرومتر در نمونه تعیین شد. از رابطه زیر نیز برای محاسبه انتخاب‌پذیری ذرات پاشمان یافته استفاده شد (واعظی و همکاران، ۲۰۱۷):

(۱)

$$\text{درصد ذره پاشمان یافته در رسوب} = \frac{\text{انتخاب‌پذیری ذرات پاشمان یافته}}{\text{درصد همان ذره در خاک}}$$

شده به روش گلوله آردی تعیین شد (کارتر و همکاران، ۱۹۷۴). شدت باران (۱۰، ۲۰ و ۳۰ میلی‌متر بر ساعت) با ایجاد توزیع یکنواخت در دستگاه باران‌ساز قابل شبیه‌سازی بود. مدت بارندگی در تمام آزمایش‌ها یکسان و برابر ۳۵ دقیقه بود. این مدت بر مبنای پیش‌آزمایش در نمونه‌های خاک برای وقوع فرآیند فرسایش سطحی انتخاب شد.



شکل ۲- نمایی از دستگاه شبیه‌ساز باران مورد استفاده در پژوهش.

### اندازه‌گیری فرسایش پاشمانی

برای اندازه‌گیری مقدار فرسایش پاشمانی از فنجان‌های پاشمان مشابه با فنجان‌های پاشمان مورگان (مورگان، ۱۹۷۸) استفاده شد. این فنجان‌ها به ارتفاع ۲/۵ سانتی‌متر و قطر ۱۰ سانتی‌متر و مساحت ۷۸/۵ سانتی‌متر مربع بودند (شکل ۳ الف). در قسمت پایین فنجان منافذ



(ب)



(الف)

شکل ۳- نمایی از کاسه‌های پاشمان مورد استفاده در پژوهش (الف) و سطل پلاستیکی (ب).

## تجزیه و تحلیل داده‌ها

داده‌ها قبل از انجام آنالیزهای مربوط به آزمایش، از نظر نرمال بودن با استفاده از تحلیل هیستوگرام و بررسی چولگی و کشیدگی مورد بررسی قرار گرفتند. تجزیه واریانس داده‌های مربوط به مقدار پاشمان و نوع ذرات پاشمان یافته در خاک‌های مختلف و در سطوح مختلف شدت باران با کمک آزمون دانکن انجام گرفت. در تمام این بررسی‌ها، برای تحلیل داده‌ها از نرم‌افزار SPSS (نسخه ۲۰) و برای رسم نمودارها از نرم‌افزار Excel (نسخه ۲۰۱۳) استفاده شد.

## ویژگی خاک‌های مورد مطالعه

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد بررسی در جدول ۱ ارائه شده است. خاک‌ها دارای محتوای بسیار اندک ماده آلی (کم‌تر از یک درصد) هستند و به دلیل وجود درصد بالایی از آهک (۱۴-۱۲ درصد) در گروه خاک‌های آهکی (دویکر و همکاران، ۲۰۰۱) قرار دارند. پایداری خاک‌دانه‌ها در آب برای مدت ۱ دقیقه بسیار پایین (۰/۵۲ تا ۰/۹۷ میلی‌متر) است و نشان از حساسیت بالای خاک به تخریب ساختمان در اثر بارندگی دارد (مامدوو و همکاران، ۲۰۰۱). ضعف پوشش گیاهی و برگشت ناچیز بقایای گیاهی، عامل اصلی کمبود ماده آلی و کاهش درجه تشکیل و پایداری خاک‌دانه‌ها است. با توجه به مقدار بالای سدیم تبادلی خاک در دو خاک لوم و لوم‌رس‌شنی، این ویژگی خاک به عنوان عامل اصلی ناپایداری خاک‌دانه‌ها و فروپاشی آن‌ها در این خاک‌ها بود.

## نتایج و بحث

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه.

بافت خاک			ویژگی‌های خاک
لوم‌رس‌شنی	لوم‌رسی	لوم	
۵۵/۵۰	۲۶/۴۲	۴۵/۸۰	شن (درصد)
۲۲/۲۵	۳۶/۰۶	۳۶/۶۵	سیلت (درصد)
۲۲/۲۵	۳۷/۵۲	۱۷/۵۵	رس (درصد)
۱۸/۲۰	۸/۷۰	۱۵/۶۰	سنگریزه (درصد)
۱/۲۹	۱/۱۷	۱/۲۰	چگالی ظاهری (گرم بر سانتی‌متر مکعب)
۰/۹۶	۰/۵۲	۰/۹۷	پایداری خاکدانه (میلی‌متر)
۲/۳۱	۲/۰۱	۲/۱۴	اندازه خاکدانه (میلی‌متر)
۸/۲۲	۵/۳۴	۲/۸۲	هدایت هیدرولیکی اشباع (سانتی‌متر بر ساعت)
۰/۳۵	۰/۴۴	۰/۵۸	ماده آلی (درصد)
۲۰/۵۵	۲۳/۲۶	۲۷/۸۵	آهک (درصد)
۶/۱۳	۲/۱۷	۵/۱۲	درصد سدیم تبادلی (ESP)

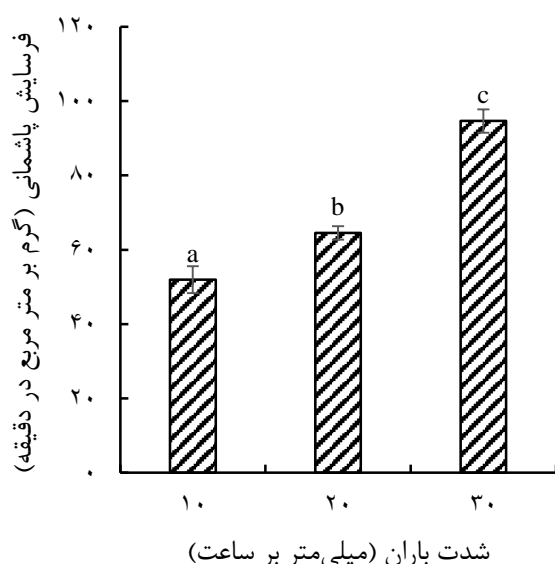
است و ذرات درشت‌تر و ریزتر از آن در برابر فرسایش پاشمانی مقاوم‌تر هستند (ژائو و همکاران، ۲۰۱۴) و همین امر موجب بالاتر بودن مقدار فرسایش پاشمانی در خاک لومرسی شد. همچنین میانگین فرسایش پاشمانی در سطوح مختلف شدت باران نشان داد که با افزایش شدت باران مقدار فرسایش پاشمانی افزایش یافت (شکل ۴ ب).

جدول ۲- تجزیه واریانس اثر بافت خاک، شدت باران و برهم‌کنش آن دو بر فرسایش پاشمانی.

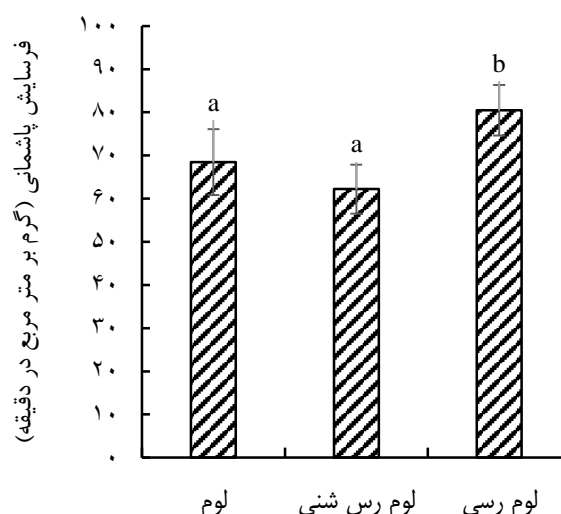
منبع	درجه آزادی	میانگین مربعات	سطح معنی‌داری
بافت خاک	۲	۵۸/۴۵	۰/۰۵
شدت باران	۲	۳۲۶/۷۸	۰/۰۰۰
بافت خاک × شدت باران	۴	۳۸/۵۱	۰/۰۵

## فرسایش پاشمانی در خاک‌ها در شدت‌های مختلف باران

نتایج تجزیه واریانس اثر بافت خاک و شدت باران بر مقدار فرسایش پاشمانی نشان داد که فرسایش پاشمانی تحت تأثیر بافت خاک ( $P < 0/05$ )، شدت باران ( $P < 0/000$ ) و برهم‌کنش آن دو ( $P < 0/05$ ) قرار دارد (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین اثر بافت خاک در شکل ۴ الف نشان داده شده است. میانگین فرسایش پاشمانی در بافت‌های مختلف نشان داد که مقدار پاشمان در خاک لومرسی، لوم و لوم‌رسی به ترتیب برابر با ۸۰/۴۵، ۶۸/۴۶ و ۶۲/۱۹ گرم بر متر مربع در دقیقه بود. پژوهش‌های پیشین نیز نشان می‌دهد که مقاومت ذرات سیلت در برابر فرسایش پاشمانی به دلیل جرم مخصوص نسبتاً پایین، فقدان قابلیت چسبندگی و تشکیل واحدهای ساختمانی ضعیف، پایین



(ب)



(الف)

شکل ۴- مقایسه میانگین فرسایش پاشمانی در بافت‌های مختلف (الف) و سطوح مختلف شدت باران (ب).

پاشمانی در سطوح مختلف شیب سطح بود. این نتایج با نتایج بلیانی و واعظی (۱۳۹۶) مطابقت داشت. آن‌ها در پژوهشی به بررسی فرسایش پاشمانی در ارتباط با شدت باران و محتوای رطوبت پیشین خاک در بافت‌های مختلف خاک با استفاده از باران شبیه‌سازی شده پرداختند. نتایج نشان داد تفاوت‌های معنی‌دار بین بافت‌های خاک، سطوح محتوای رطوبت پیشین و شدت باران ( $P < 0/001$ ) وجود دارد.

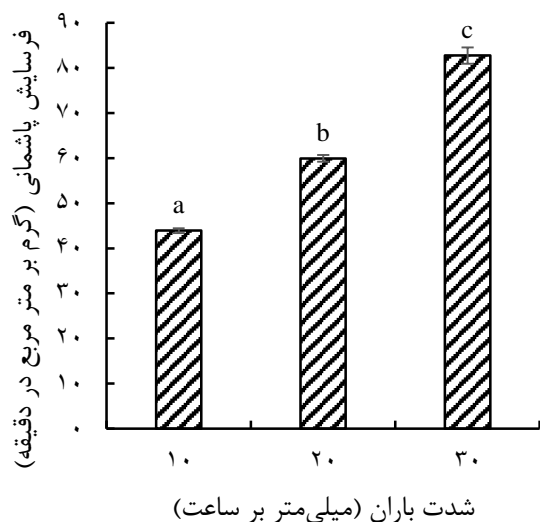
## تأثیر شدت باران بر فرسایش پاشمانی در

### بافت‌های مختلف

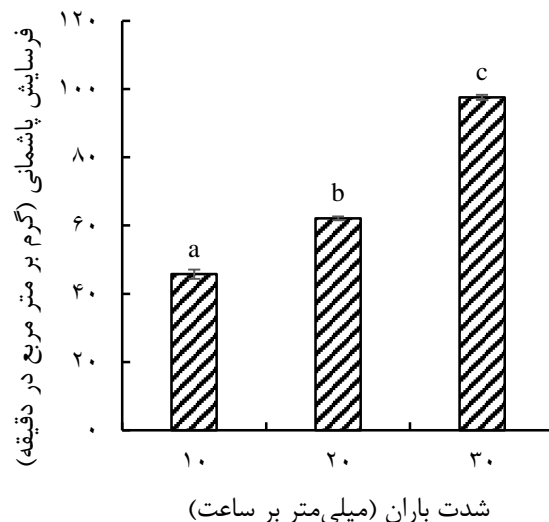
نتایج تجزیه واریانس اثر شدت باران بر مقدار فرسایش پاشمانی در بافت‌های مختلف نشان داد که شدت باران اثر معنی‌دار بر مقدار فرسایش پاشمانی در تمامی بافت‌ها داشت (جدول ۳). شکل ۵ نمودار مقایسه میانگین فرسایش پاشمانی در سه سطح شدت باران را در بافت‌های مختلف نشان می‌دهد. در میان سه بافت خاک مورد مطالعه خاک لومرسی دارای کم‌ترین تغییرات فرسایش

جدول ۳- تجزیه واریانس اثر شدت باران بر فرسایش پاشمانی در بافت‌های مختلف.

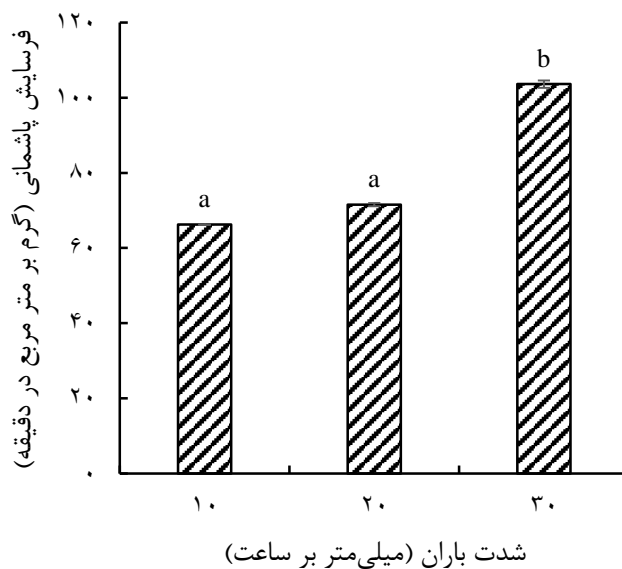
منبع	بافت	درجه آزادی	میانگین مربعات	سطح معنی داری
شدت باران	لومرسی	۲	۹۲/۷۶	۰/۰۰۰
	لوم	۲	۱۵۸/۷۹	۰/۰۰۰
	لومرسی‌شنی	۲	۸۶/۲۱	۰/۰۰۰



(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۵- مقایسه میانگین فرسایش پاشمانی در سطوح مختلف شدت باران در بافت لوم (الف) لومرسی‌شنی (ب) و لومرسی (ج).



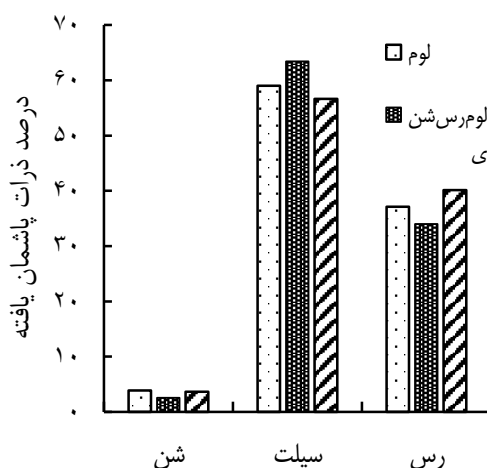
### انتقال پذیری ذرات خاک در شدت‌های مختلف باران

نتایج تجزیه واریانس اثر بافت خاک، شدت باران و برهم‌کنش آن دو بر نوع ذرات پاشمان یافته نشان داد که بافت خاک، شدت باران و برهم‌کنش آن دو اثر قابل توجهی بر نوع ذرات پاشمان یافته در بافت‌های مختلف داشت (جدول ۴). از میان ذرات پاشمان یافته تنها شن تحت تأثیر برهم‌کنش بافت و شدت باران قرار نگرفت. علت این موضوع مقاومت بسیار بالای ذرات شن نسبت به پاشمان به دلیل جرم بسیار بالای آن‌ها می‌باشد. شکل ۶ مقایسه میانگین ذرات پاشمان یافته در بافت‌های مختلف را نشان می‌دهد. بالاترین درصد شن، سیلت و رس پاشمان یافته به ترتیب در بافت‌های لوم، لوم‌رس‌شنی و لوم‌رسی مشاهده شد. به طور کلی ذرات سیلت حساسیت بیش‌تری نسبت ضربه قطرات باران داشتند و درصد بیش‌تری از ذرات پاشمان یافته را در هر سه بافت به خود اختصاص دادند. ذرات شن، سیلت و رس به ترتیب ۳/۲۳، ۵۹/۷۰ و ۳۷/۰۷ درصد از

سهم ذرات پاشمان یافته را شامل شدند. شدت باران در هر بافت نیز اثر قابل توجهی بر نوع ذرات پاشمان یافته داشت (جدول ۵). به طور کلی در تمامی شدت‌ها بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار ذرات پاشمان یافته مربوطه به ذرات سیلت و شن بود و با افزایش شدت باران سهم ذرات شن افزایش پیدا کرد. در پژوهشی والتا و همکاران (۲۰۰۶) بیان کردند که قطرات باران پس از برخورد با سطح خاک به دلیل ضربه مکانیکی خود باعث تخریب خاک‌دانه، ایجاد سله، کاهش نفوذپذیری و در نتیجه افزایش هدررفت ذرات فرسایش پذیر از جمله ذرات سیلت می‌شود. صادقی و همکاران (۲۰۱۷) در پژوهشی به بررسی تغییرپذیری توزیع اندازه ذرات رسوب در بالا و پایین دست پلات در شدت‌های مختلف بارندگی و شیب‌های مختلف پرداختند. نتایج نشان داد که ذرات پاشمان یافته در پایین دست تحت تأثیر شدت باران قرار دارد ( $P < 0.05$ ). هم‌چنین اختلاف معنی‌داری بین ذرات شن، سیلت و رس پاشمان یافته در پایین دست با ذرات شن، سیلت و رس خاک اصلی در دو شیب ۵ و ۱۵ درصد وجود داشت.

جدول ۵- تجزیه واریانس اثر شدت باران بر نوع ذرات پاشمان یافته در بافت‌های مختلف.

منبع	بافت	ذرات اولیه	درجه آزادی	میانگی	سطح معنی‌داری
لوم‌رسی		شن	۲	۵۶/۳۳	۰/۰۰۰
		سیلت	۲	۸۰/۳۲	۰/۰۰۰
		رس	۲	۳۳/۷۸	۰/۰۵
شدت باران	لوم	شن	۲	۲۹/۷۷	۰/۰۰۰
		سیلت	۲	۳۰۶/۳۳	۰/۰۰۰
		رس	۲	۱۵۰/۱۱	۰/۰۰۰
لوم‌رس‌شنی	ی	شن	۲	۱۴/۷۷	۰/۰۰۱
		سیلت	۲	۲۴۸/۷۸	۰/۰۱
		رس	۲	۱۶۲/۳۳	۰/۰۱

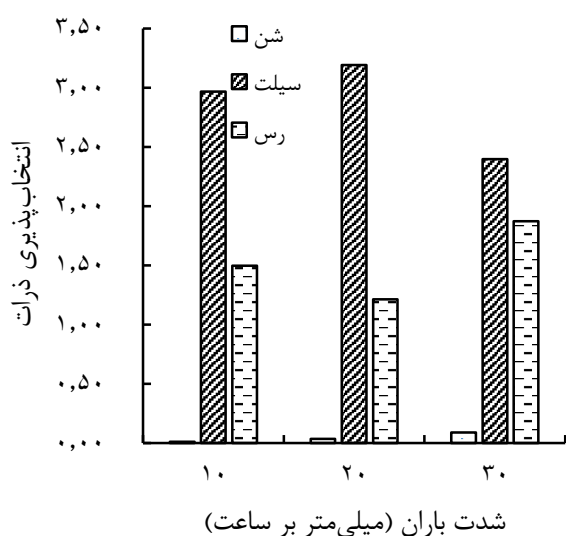


شکل ۶- مقایسه میانگین ذرات پاشمان یافته در بافت‌های مختلف.

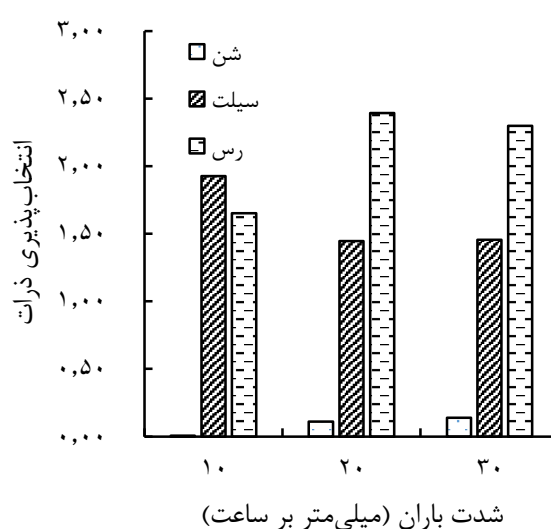
سنگین بودن ذرات شن و قابلیت انتقال پذیری کم این ذرات دانست. صادقی و همکاران (۱۳۹۵) در پژوهشی به بررسی توزیع اندازه ذرات پاشمان در طول فلوم آزمایشگاهی تحت تأثیر شیبها (۵، ۱۵ و ۲۵ درصد) و شدت های مختلف بارندگی (۳۰، ۶۰ و ۹۰ میلی متر بر ساعت) پرداختند. نتایج نشان داد که شدت های مختلف بارندگی تأثیر معنی داری بر همه مؤلفه ها غیر از ذرات کوچک تر از دو میکرون و چولگی ذرات رسوب در بالادست فنجان پاشمان داشت؛ اما در پایین دست فنجان پاشمان همه مؤلفه ها غیر از  $D_{10}$ ، جورشدگی و کشیدگی ذرات رسوبی نسبت به شدت های مختلف بارندگی، شیب های مختلف و تعامل آن ها دارای اختلاف معنی دار بودند.

## انتخاب پذیری ذرات پاشمان یافته در شدت های مختلف باران

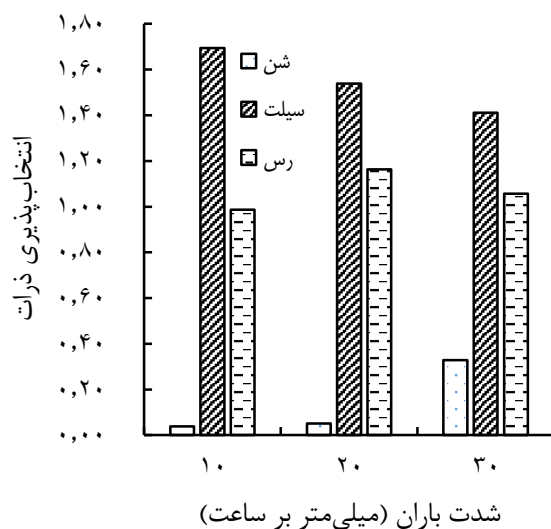
شکل ۷ میانگین انتخاب پذیری ذرات پاشمان یافته در سطوح مختلف شدت باران را نشان می دهد. بر این اساس در تمامی بافت ها (به جز خاک لوم) انتخاب پذیری ذرات سیلت در سطوح مختلف شدت باران بیش تر از سایر ذرات بود. در خاک لوم انتخاب پذیری ذرات رس بیش تر از ذرات سیلت بود که علت این موضوع پایین بودن مقدار ذرات رس در نمونه اولیه خاک بود. هم چنین انتخاب پذیری ذرات شن در سطوح مختلف شدت باران بسیار کم تر از سایر ذرات پاشمان یافته بود که علت این موضوع را می توان



(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۷- مقایسه میانگین انتخاب پذیری ذرات پاشمان یافته در سطوح مختلف شدت باران در بافت لوم (الف)، لوم رس شنی (ب) و لومرسی (ج).

## نتیجه گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که فرسایش پاشمانی به شدت تحت تأثیر بافت خاک، شدت باران و برهم کنش بین آن دو قرار دارد. بیشترین و کمترین مقدار فرسایش پاشمانی به ترتیب در خاک لومرسی و لومرسی شنی مشاهده شد. همچنین ذرات سیلت بیشترین حساسیت را نسبت به ضربه قطرات باران و فرسایش پاشمانی در تمامی بافت‌ها داشتند که علت این موضوع مقاومت ناچیز ذرات سیلت نسبت به فرسایش می‌باشد. انتخاب پذیری ذرات سیلت نیز در سطوح مختلف شدت باران در بافت لومرسی و لومرسی شنی بیش تر از سایر ذرات پاشمان یافته بود. ذرات شن، سیلت و رس به ترتیب ۳/۲۳، ۵۹/۷۰ و ۳۷/۰۷ درصد از سهم ذرات پاشمان یافته را شامل شدند. به طور کلی این پژوهش نشان می‌دهد که خاک‌هایی که دارای مقادیر بیشتری از ذرات سیلت و رس می‌باشند حساسیت بیشتری نسبت به فرسایش پاشمانی و ضربه قطرات باران در آغاز بارندگی داشته و زمینه را برای وقوع سیلاب‌های ویرانگر در مناطق خشک و نیمه‌خشک فراهم می‌کنند.

## منابع

- ۱) بافکار، ع. و مجردی، ح. ۱۳۸۵. حفاظت آب و خاک. انتشارات دانشگاه رازی. صفحه ۳۵-۱۱.
- ۲) بشارت، ف. و واعظی، ع.ر. ۱۳۹۴. تأثیر الگوی توزیع زمانی بارندگی طی رخداد بر رواناب و هدررفت خاک تحت باران‌های شبیه‌سازی شده. علوم و مهندسی آبخیزداری ایران. ۹: ۲۹-۱۸.
- ۳) بلیانی، ع. و واعظی، ع.ر. ۱۳۹۶. حساسیت خاک‌ها با بافت متفاوت به فرسایش پاشمانی تحت تأثیر شدت باران و محتوای رطوبتی پیشین. نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک. ۲۴(۲): ۶۷-۸۴.
- ۴) حسن‌زاده، ح.، واعظی، ع.ر. و محمدی، م.ح. ۱۳۹۲. تغییرات رواناب در ابعاد کرت در نمونه‌های خاک با بافت مختلف تحت رخدادهای یکسان باران شبیه‌سازی شده. تحقیقات آب و خاک ایران. ۴۴(۳): ۲۵۴-۲۴۵.
- ۵) رفاهی، ح. ۱۳۸۵. فرسایش آبی و کنترل آن. چاپ پنجم. انتشارات دانشگاه تهران. صفحه ۱۳۲-۲۷.
- ۶) صادقی، س.ج.ر.، کیانی هرچگانی، م. و اسدی، ح. ۱۳۹۵. توزیع اندازه ذرات در طول فلوام آزمایشگاهی تحت تأثیر شیب‌ها و شدت‌های مختلف بارندگی. تحقیقات آب و خاک ایران. ۴۷(۴): ۶۶۴-۶۵۷.
- ۷) عبدی‌نژاد، پ.، فیض‌نیا، س. و پیروان، ح.ر. ۱۳۹۳. مقایسه فرسایش پذیری خاک اراضی ماری استان زنجان با استفاده از دستگاه شبیه‌ساز باران. نشریه پژوهش‌های خاک. ۲۵(۲): ۴۱۹-۴۰۷.
- ۸) غلامی، ل. و کریمی، ن. ۱۳۹۷. اثر مدت بارندگی و رطوبت خاک بر تغییرات پاشمان خاک. علوم و مهندسی آبخیزداری ایران. ۱۲(۴۲): ۹۱-۱۰۱.
- ۹) فرومدی، م. و واعظی، ع.ر. ۱۳۹۶. تخریب فیزیکی و ظرفیت جدا شدن ذره از شیار تحت تأثیر شدت و ضربه قطرات باران در خاک ماری. نشریه علوم آب و خاک. ۲۱(۲): ۲۷۷-۲۶۳.
- ۱۰) کیانی هرچگانی، م. و صادقی، س.ج.ر. ۱۳۹۶. اثر رگبارهای متوالی بر مؤلفه‌های فرسایش پاشمانی طی دو شدت مختلف بارندگی در شرایط آزمایشگاهی. اکوهیدرولوژی. ۴(۳): ۸۴۶-۸۳۷.
- ۱۱) کیانی هرچگانی، م.، صادقی، س.ج.ر. و اسدی، ح. ۱۳۹۴. تحلیل مقایسه‌ای اثر شدت باران و شیب پلات‌های آزمایشگاهی بر مؤلفه‌های فرسایش ناشی از اثر قطره‌های باران (RIIE). تحقیقات آب و خاک تهران. ۴۶(۴): ۶۴۰-۶۳۱.
- ۱۲) واعظی، ع.ر. و قره‌داغلی، ح. ۱۳۹۲. کمی‌سازی گسترش فرسایش شیاری در خاک‌های ماری در حوزه آبخیز زنجان‌رود در شمال غرب زنجان. نشریه آب و خاک. ۲۷(۵): ۸۸۱-۸۷۲.
- ۱۳) هنریخش، الف و حیایوی، ف. ۱۳۹۶. مطالعه آزمایشگاهی فرسایش پاشمانی در بافت‌های مختلف خاک با استفاده از شبیه‌ساز باران. پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی. ۶: ۳-۱۶۲-۱۵۱.
- 14) Asadi, H., Moussavi, A., Ghadiri, H. and Rose, C.W. 2011. Flow-driven soil erosion processes and the size selectivity of sediment. Journal of Hydrology. 406(1-2): 73-81.
- 15) Blake, G.R. and Hartge, K.H. 1986. Bulk Density 1. Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Methods. (methodsofsoilan1). 363-375.
- 16) Bouyoucos, G.J. 1962. Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils 1. Agronomy journal. 54(5): 464-465.
- 17) Carter, C.E., Greer, J.D., Braud, H.J. and Floyd, J.M. 1974. Raindrop characteristics in south central United States. Transactions of the ASAE. 17(6): 1033-1037.
- 18) Cheng, Q., Cai, Q. and Ma, W. 2008. Comparative study on rain splash erosion of representative soils in China. Chinese Geographical Science. 18(2): 155-161.
- 19) Duiker, S.W., Flanagan, D.C. and Lal, R. 2001. Erodibility and infiltration characteristics of five major soils of southwest Spain. Catena. 4(2): 103-121.

- 35) Valette, G., Prévost, S., Lucas, L. and Léonard, J. 2006. SoDA project: A simulation of soil surface degradation by rainfall. *Computers & Graphics*. 30(4): 494-506.
- 36) Vermang, J., Demeyer, V., Cornelis, W.M. and Gabriels, D. 2009. Aggregate stability and erosion response to antecedent water content of a loess soil. *Soil Science Society of America Journal*. 73(3): 718-726.
- 37) Walkley, A. and Black, I.A. 1947. Determination of organic matter in the soil by chromic acid digestion. *Soil Science*. 63: 251-264.
- 38) Walling, D.E. 1988. Erosion and sediment yield research some recent perspectives. *Journal of Hydrology*. 100(1-3): 113-141.
- 39) Yao, J.J., Cheng, J.H., Zhou, Z.D., Sun, L. and Zhang, H.J. 2018. Effects of herbaceous vegetation coverage and rainfall intensity on splash characteristics in northern China. *Catena*. 167: 411-421.
- 40) Zhao, L., Liang, X. and Wu, F. 2014. Soil surface roughness change and its effect on runoff and erosion on the Loess Plateau of China. *Journal of Arid Land*. 6(4): 400-409.
- 20) Erskine, W.D., Mahmoudzadeh, A.H.M.A.D. and Myers, C. 2002. Land use effects on sediment yields and soil loss rates in small basins of Triassic sandstone near Sydney, NSW, Australia. *Catena*. 49(4): 271-287.
- 21) Falsone, G., Bonifacio, E. and Zanini, E. 2012. Structure development in aggregates of poorly developed soils through the analysis of the pore system. *Catena*. 95: 169-176.
- 22) Goh, T.B., Arnaud, R.S. and Mermut, A.R. 1993. Aggregate stability to water. *Soil Sampling and Methods of Analysis*. 177-180.
- 23) Huang, L., Wang, C.Y., Tan, W.F., Hu, H.Q., Cai, C.F. and Wang, M.K. 2010. Distribution of organic matter in aggregates of eroded Ultisols, Central China. *Soil and Tillage Research*. 108(1-2): 59-67.
- 24) Kemper, W.D. and Rosenau, R.C. 1986. Aggregate stability and size distribution. 425-442.
- 25) Klute, A. and Dirksen, C. 1986. Hydraulic conductivity and diffusivity: Laboratory methods. *Methods of soil analysis: part 1 physical and mineralogical methods (methodsofsoilan1)*. 687-734.
- 26) Ma, R.M., Li, Z.X., Cai, C.F. and Wang, J.G. 2014. The dynamic response of splash erosion to aggregate mechanical breakdown through rainfall simulation events in Ultisols (subtropical China). *Catena*. 121: 279-287.
- 27) Mamedov, A.I., Levy, G.J., Shainberg, I. and Letey, J. 2001. Wetting rate, sodicity, and soil texture effects on infiltration rate and runoff. *Soil Research*. 39(6): 1293-1305.
- 28) Morgan, R.P.C. 1978. Field studies of rainsplash erosion. *Earth Surface Processes*. 3(3): 295-299.
- 29) Page, A.L. 1982. Method of soil analysis. Part 2: chemical and microbiological properties. *Soil Science Society of American Madison, Wisconsin, USA*.
- 30) Sadeghi, S.H., Harchegani, M.K. and Asadi, H. 2017. Variability of particle size distributions of upward/downward splashed materials in different rainfall intensities and slopes. *Geoderma*. 290: 100-106.
- 31) Steiner, K.G. and Williams, R. 1996. Causes of soil degradation and development approaches to sustainable soil management. *Weikersheim, Germany: Margraf Verlag*. 93
- 32) United States. Department of Agriculture, 1972. Soil survey laboratory methods and procedures for collecting soil samples. *US Government Printing Office*.
- 33) Vaezi, A.R. 2014. Modeling runoff from semi-arid agricultural lands in Northwest Iran. *Pedosphere*. 24(5): 595-604.
- 34) Vaezi, A.R., Abbasi, M., Keesstra, S. and Cerdà, A. 2017. Assessment of soil particle erodibility and sediment trapping using check dams in small semi-arid catchments. *Catena*. 157: 227-240.