

تغییرات زمانی فرآیندهای تخریب و پاشمان در خاک مارنی تحت باران شبیه‌سازی شده

علیرضا واعظی^{۱*}، عطیه رستمی و محمدحسین محمدی

استادیار گروه خاکشناسی دانشکده کشاورزی دانشگاه زنجان؛ vaezi.alireza@gmail.com

دانشجوی کارشناسی ارشد خاکشناسی دانشگاه زنجان؛ ati_b5177@yahoo.com

استادیار گروه خاکشناسی دانشکده کشاورزی دانشگاه زنجان؛ mohammadi6683@yahoo.com

چکیده

فرآیندهای تخریب خاکدانه‌ها و پاشمان ذرات خاک از مهم‌ترین پیامدهای برخورد قطرات باران بر سطح خاک می‌باشند. این تحقیق به منظور بررسی تغییرات زمانی فرآیندهای تخریب و پاشمان در خاک بکر مارنی در استان زنجان انجام گرفت. آزمایش در هشت تیمار زمان بارندگی با سه تکرار در قالب طرح کاملاً تصادفی در سال ۱۳۸۹ انجام شد. برای این منظور پس از جمع‌آوری خاکدانه‌های با قطر ۶ تا ۸ میلی‌متر، خاکدانه‌ها در ۲۴ جعبه مسطح به ابعاد ۳۰ سانتی‌متر در ۴۰ سانتی‌متر قرار داده شدند. جعبه‌ها در فواصل زمانی مختلف (۷/۵، ۱۵، ۲۲/۵، ۳۰، ۳۷/۵، ۴۵، ۵۲/۵ و ۶۰ دقیقه) زیر دستگاه شبیه‌ساز باران با شدت ثابت ۴۰ میلی‌متر بر ساعت قرار گرفتند. میزان تخریب با مقایسه میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها قبل و بعد از بارندگی به روش الک خشک و میزان پاشمان از جمع‌آوری ذرات خاک پراکنده شده در اطراف جعبه‌ها طی هر رخداد بارندگی و تعیین وزن خشک آن‌ها به دست آمد. بر اساس نتایج رابطه مثبت معنی‌داری بین زمان بارندگی و تخریب خاکدانه ($R^2=0/99$, $p < 0/01$) و نیز پاشمان ذرات خاک ($R^2=0/95$, $p < 0/05$) وجود داشت. در ابتدای بارندگی (۷/۵) دقیقه میزان تخریب خاکدانه‌ها بیشتر از پاشمان ذرات خاک بود. با تداوم بارندگی، میزان پاشمان نیز به دنبال تخریب خاکدانه‌ها افزایش یافت و در زمان ۴۵ دقیقه به دلیل تخریب بیشتر خاکدانه‌ها، سله در سطح نمایان شد. در این زمان، میزان تخریب و پاشمان تقریباً به اوج رسید. پس از این زمان، تشکیل سله از تخریب بیشتر خاکدانه‌ها و تا اندازه‌ای از پاشمان بیشتر ذرات جلوگیری کرد. بین میزان پاشمان ذرات و تخریب خاکدانه‌ها رابطه مثبت معنی‌دار ($p < 0/05$) وجود داشت.

واژه‌های کلیدی: پاشمان، تخریب، تداوم بارندگی، جدا شدن ذرات، میانگین وزنی قطر خاکدانه

مقدمه

می‌دهد (ژولین، ۱۹۹۵). فرسایش آبی یکی از گسترده‌ترین انواع فرسایش خاک می‌باشد که تعادل بین نیروی

فرسایش خاک فرآیندی است که طی آن جداسازی، انتقال و رسوب ذرات خاک از مکانی به مکان دیگر رخ

^۱ نویسنده مسئول، آدرس: زنجان، کیلومتر ۶ جاده تبریز، دانشگاه زنجان، دانشکده کشاورزی، گروه خاکشناسی،

کد پستی ۳۸۷۹۱-۴۵۳۷۱.

* دریافت: اسفند ۱۳۸۹ و پذیرش: دی ۱۳۹۰

پژوهشی روز-سینوگا و رومرو- دیاز (۲۰۱۰) با استفاده از دستگاه شبیه‌ساز باران میزان تخریب خاک را بررسی کرده و نشان دادند که قطرات باران با افزایش مقدار رطوبت خاک، میزان تخریب‌پذیری خاک را افزایش می‌دهند. در پژوهشی دیگر والتا و همکاران (۲۰۰۶) تاثیر قطرات باران در میزان تخریب خاک بررسی کرده و به این نتیجه رسیدند که قطرات باران پس از برخورد با سطح خاک به دلیل ضربه مکانیکی خود باعث تخریب خاک، ایجاد سله و کاهش نفوذپذیری خاک می‌شوند.

پاشمان ذرات^۳ 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. گزارش‌ها نشان می‌دهد که فرسایش پاشمانی به عوامل متعددی نظیر شدت بارندگی، خصوصیات قطره باران، خصوصیات خاک و میزان رطوبت اولیه آن بستگی دارد (باری و همکاران، ۲۰۱۰). یکی از مهم‌ترین خصوصیات خاک که در میزان پاشمان موثر می‌باشد بافت خاک است. هرچه ذرات تشکیل‌دهنده خاک ریزتر باشند، به دلیل وجود نیروی چسبندگی زیاد متلاشی شدن خاکدانه‌ها مشکل‌تر و در مقابل حمل آن‌ها آسان‌تر خواهد بود. به این دلیل متلاشی شدن خاکدانه‌ها در خاک‌های رسی نسبت به خاک‌های شنی مشکل‌تر است اما با این وجود این ذرات آسان‌تر از ذرات شن جابه‌جا می‌شوند (ون‌دیجک و همکاران، ۲۰۰۲). در پژوهشی لگوت و همکاران (۲۰۰۵) رابطه بین اندازه ذرات و فاصله ذرات پاشمان یافته در خاک‌های غرب فرانسه را بررسی کردند. برای این کار خاکدانه‌های با قطر ۳ تا ۵ میلی‌متری زیر دستگاه شبیه‌ساز باران قرار داده شدند. نتایج نشان داد که مقدار پاشمان خاک، فاصله خاک پاشمان یافته و توزیع اندازه ذرات خاک به پایداری ساختمان خاک بستگی دارد. بیشترین مقدار پاشمان مربوط به ذرات شن بود و کم‌ترین آن مربوط به ذرات رس بود. علت این موضوع چسبندگی زیاد ذرات رس و استحکام ساختمان رس‌ها بود. بر اساس مطالعات ون‌دیجک و همکاران (۲۰۰۲) یک رابطه نمایی

حرکتی آب در سطح خاک و مقاومت خاک را بیان می‌کند (ژنگ، ۲۰۰۵). مطالعات انجام شده در مورد فرسایش آبی نشان می‌دهد که این فرسایش باعث تغییر در بسیاری از خصوصیات خاک از جمله کاهش ظرفیت نگهداشت، کاهش پایداری خاکدانه‌ها و تخریب خاک می‌شود (جین و همکاران، ۲۰۰۸). شناخت عوامل و فرآیندهای موثر بر فرسایش خاک در یک منطقه در ارائه راهکاری برای حفاظت خاک ضروری می‌باشد. گزارش‌ها نشان می‌دهد که عامل اصلی فرسایش آبی، قطرات باران است که به عنوان مهم‌ترین شکل نزولات آسمانی نقش مهمی در فرسایش خاک دارد (گیووانینی و همکاران، ۲۰۰۱).

یکی از مهم‌ترین اثرات برخورد قطرات باران بر سطح خاک، تخریب خاکدانه‌ها^۱ می‌باشد. پایداری خاکدانه که مقاومت ذرات آن را در برابر جدا شدن نشان می‌دهد در میزان تخریب خاکدانه در اثر قطرات باران نقش مهمی دارد (رفاهی، ۱۳۸۵). پایداری اندک خاکدانه‌ها منجر به تخریب آسان آن‌ها، تراکم خاک، ایجاد سله، کاهش سرعت نفوذ آب به خاک، افزایش رواناب و فرسایش خاک می‌شود (استینر، ۱۹۹۶). گزارش‌ها نشان می‌دهد مهم‌ترین عامل تشکیل سله، عدم پایداری خاکدانه‌ها می‌باشد. برخورد قطرات باران باعث شکسته شدن خاکدانه‌ها و پراکندگی رس‌ها و به دنبال آن تشکیل سله می‌گردد (شهبازی و همکاران، ۱۳۸۸). میانگین وزنی قطر خاکدانه^۲ (MWD) نمایه بسیار مناسبی جهت بررسی پایداری خاکدانه‌ها و همچنین متوسط قطر خاکدانه‌های موجود در خاک می‌باشد. برخی ویژگی‌های خاک در پایداری خاکدانه و در نتیجه در میزان تخریب آن موثر هستند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که میزان پایداری خاکدانه (MWD) در نواحی نیمه‌خشک متأثر از ویژگی‌های مختلف خاک از جمله رس، ماده آلی و آهک می‌باشد (واعظی و همکاران، ۱۳۸۶). مطالعات دیگر نشان می‌دهد که با افزایش میزان رس و کربنات کلسیم خاک، MWD خاکدانه‌ها افزایش می‌یابد (زنگی آبادی و همکاران، ۱۳۸۹). رطوبت پیشین خاک در میزان تخریب خاکدانه نقش مهمی دارد. از آنجا که مقدار رطوبت خاک در زمان‌های مختلف طی مدت بارندگی تغییر می‌کند بنابراین می‌توان انتظار داشت که میزان تخریب خاکدانه‌ها در زمان‌های مختلف بارندگی متفاوت باشد. گزارش‌ها نشان می‌دهند که کاهش پایداری خاکدانه‌ها و منافذ بین خاکدانه‌ای، انبساط غیر یکنواخت ذرات و نیز حبس هوا از جمله عوامل تخریب خاکدانه‌ها پس از خیس شدن می‌باشند (کمپر و روزنا، ۱۹۸۶). در

³: articles splash

¹: aggregate breakdown

²: aggregate mean weight diameter

کاری دشوار است. از این رو با استفاده از دستگاه‌های شبیه‌ساز باران می‌توان با صرفه‌جویی در زمان، نسبت به بررسی دقیق فرآیندهای فرسایش بارانی اقدام کرد (آزموده و همکاران، ۱۳۸۹). بنابراین هدف از این تحقیق بررسی تغییرات زمانی فرآیندهای تخریب خاکدانه‌ها و پاشمان ذرات، در خاک مارنی تحت باران شبیه‌سازی شده بود.

مواد و روشها

منطقه مورد تحقیق و نمونه‌برداری خاک

منطقه مورد مطالعه واقع در ۵۰ کیلومتری غرب زنجان، در حدواسط روستای ایده لو- سرچم واقع بود (شکل ۱). برای انجام این تحقیق، یک خاک بکر مارنی از مناطق تحت فرسایش شدید بارانی در سال ۱۳۸۹ انتخاب شد. مختصات جغرافیایی منطقه که به وسیله دستگاه مکان‌یاب جهانی (GPS) تعیین شد به صورت ۵۸° و ۵۶° و ۳۶° عرض شمالی و ۲۲° و ۰۶° و ۴۸° طول شرقی بود و ارتفاع آن از سطح دریا ۱۲۹۳ متر بود. متوسط بارندگی سالانه ۲۵۵/۴ میلی‌متر گزارش شده است. متوسط درجه حرارت گرم‌ترین ماه سال ۲۰/۶ درجه سانتی‌گراد در تیرماه و متوسط درجه حرارت سردترین ماه سال ۰/۵ درجه سانتی‌گراد در دی ماه گزارش شده است. اقلیم منطقه بر اساس روش اقلیمی آمبرژه، نیمه خشک سرد بود. بررسی‌ها نشان داد که بیش از ۵۱ درصد از سطح حوزه دارای فرسایش شیاری و ۲۶ درصد دارای آثار فرسایش خندقی بود (سازمان جهاد کشاورزی استان زنجان، ۱۳۸۱). با توجه به ضعف پوشش گیاهی و حساسیت بالای خاک به تخریب، نشانه‌های فرسایش بارانی (تخریب سطح خاک و تشکیل سله) آشکارا در کل منطقه قابل مشاهده بود.

بررسی فرآیندهای تخریب و پاشمان

برای تعیین فرآیندهای تخریب و پاشمان در زمان‌های مختلف از آغاز بارندگی، آزمایش در هشت رخداد تداوم بارندگی در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار انجام گرفت. بر این اساس ۲۴ جعبه حاوی خاکدانه‌های با قطر ۶ تا ۸ میلی‌متر تهیه شد. برای این کار الک ۶ و ۸ میلی‌متر و ۲۴ جعبه پلاستیکی مسطح و نفوذپذیر به ابعاد ۳۰×۴۰ سانتی‌متر و با عمق ۱۰ سانتی‌متر به منطقه نمونه‌برداری منتقل شدند. دیواره جعبه‌ها بدون منفذ و قطر سوراخ کف آن‌ها کمتر از دو میلی‌متر بود. برای این منظور کف جعبه‌ها با توری پوشانده شد. هم‌چنین برای زهکشی بهتر خاک، کف جعبه‌ها با لایه‌ای از شن به ضخامت ۲ سانتی‌متر پوشانده شد. نمونه‌های خاکدانه با قطر بین ۶ تا ۸ میلی‌متر از عمق ۵ تا ۲۰ سانتی‌متر تهیه و در داخل جعبه‌ها تا ارتفاع ۸ سانتی‌متر قرار داده شدند. علت استفاده از خاکدانه‌های با قطر ۶ تا ۸ میلی‌متر بررسی

بین مقدار توده پاشمان یافته و فاصله از منبع پاشمان وجود داشت به طوری که با افزایش فاصله از منبع، مقدار مواد پاشمان یافته به صورت نمایی کاهش یافت. این پژوهشگران نشان دادند که خاک‌های مختلف به یک میزان پاشمان ندارند. فاصله پاشمان در خاک‌هایی که بیشترین مقاومت و استحکام را داشتند کمتر از خاک‌های نسبتاً ناپایدار بود. در پژوهشی خالدیان (۱۳۸۶) رابطه بین میزان فرسایش پاشمانی و شدت بارندگی را در ایستگاه‌های هواشناسی بررسی کرد. برای این منظور ماسه‌های جابجا شده از کاسه‌های پاشمان در پایه زمانی یک ساعته اندازه‌گیری شدند. نتایج نشان داد که با افزایش شدت بارندگی میزان فرسایش پاشمانی افزایش می‌یابد.

خاک مارنی یکی از حساس‌ترین خاکها در برابر فرسایش آبی می‌باشد که به دلیل نوع بافت و در مواردی داشتن املاح با انحلال‌پذیری بالا، مقاومت لازم در برابر ضربه قطرات باران را نداشته و در صورت فرارگیری در شرایط نامساعد به سرعت فرسایش می‌یابد (تمرتاش و همکاران، ۱۳۸۶). هرچند مارنها سازندهایی بسیار حساس در برابر ضربه قطرات باران می‌باشند لیکن اغلب تحقیقات در آنها مربوط به عوامل تشکیل فرسایش شیاری و آبکندی (خندقی) می‌باشد. در تحقیقی علیرضایی (۱۳۸۴) با بررسی علل تشکیل خندق‌ها در استان همدان به این نتیجه رسید که با افزایش مقدار کربنات کلسیم، میزان حساسیت مارنها در برابر فرسایش آبی کاهش و ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی آن‌ها بهبود یافت. در پژوهشی پیروان و اسدی (۱۳۸۴) نشان دادند که آهک به عنوان ماده‌ای سیمانی، پایداری خاکدانه‌ها را در پهنه‌های مارنی همدان افزایش داد. افزایش پایداری خاکدانه‌ها، نفوذپذیری خاک را نیز افزایش داد. نفوذپذیری با مقدار شن ریز و درشت همبستگی مثبت و با مقدار رس همبستگی منفی نشان داد. در پژوهشی تمرتاش و همکاران (۱۳۸۶) با بررسی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی ۲۹ نمونه از مارن‌های محدوده بیرجند به این نتیجه رسیدند که هر قدر میزان یونهای Ca^{2+} , HCO_3^- , Na^+ , Cl^- و گچ در مارن‌ها بیشتر - شد، شدت فرسایش شیاری و خندقی بالاتر رفت.

بررسی تحقیقات پیشین نشان می‌دهد که تاکنون مطالعه‌ای دقیق در مورد تغییرات زمانی فرآیندهای تخریب و پاشمان طی بارندگی انجام نگرفته و اغلب تحقیقات مربوط به بررسی کلی این فرآیندها بوده است. با توجه به اهمیت فرسایش آبی در خاک‌های مارنی، بررسی تغییرات زمانی فرآیندهای فرسایش بارانی در آن‌ها حائز اهمیت است. بدیهی است که مطالعه فرآیندهای تخریب و پاشمان تحت باران طبیعی طی زمان‌های مختلف به هنگام بارندگی

تعیین ویژگی‌های خاک

برای تعیین ویژگی‌های خاک مارنی مورد بررسی، ابتدا نمونه خاک پس از هواخشک شدن از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند. فراوانی ذرات خاک به روش هیدرومتری (دای، ۱۹۶۵)، ماده آلی خاک به روش والکی بلاک (والکی و بلاک، ۱۹۳۴)، واکنش خاک در گل اشباع با استفاده از pH متر، هدایت الکتریکی در عصاره گل اشباع با استفاده از EC متر، درصد آهک به روش خشتی‌سازی به وسیله اسید کلریدریک نرمال (پیچ و همکاران، ۱۹۸۷)، درصد گچ به روش استن (USDA، ۱۹۷۲) و درصد سدیم تبادل‌ی خاک (ESP) به روش استات آمونیوم اندازه‌گیری شدند. پایداری خاکدانه‌ها در آب به روش الک تر (یودر، ۱۹۳۶) در خاکدانه‌های با قطر ۶ تا ۸ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. برای این منظور مقدار خاکدانه‌های پایدار پس از گذاشتن روی سری الکها و حرکت دادن آنها با دستگاه مکانیکی به مدت یک دقیقه درون آب مقطر اندازه‌گیری شد و از رابطه (۳) میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های پایدار به دست آمد.

$$\sum_{i=1}^n W_i \cdot \bar{X}_i \text{ MWD}_{\text{wet}} = \text{رابطه (۳)}$$

رابطه (۴)

$$\frac{W_i(a+s) - W_i(s)}{\sum_{i=1}^n W_i(a+s) - \sum_{i=1}^n W_i(s)} W_i =$$

که در آن: $W_i(a+s)$ وزن توده خاک باقی مانده پس از آزمایش روی هر الک (خاکدانه باقی مانده + شن) و $W_i(s)$ وزن شن روی هر الک پس از آزمایش (گرم) می‌باشد.

تجزیه و تحلیل داده‌ها

فرآیندهای تخریب و پاشمان به عنوان متغیرهایی وابسته به زمان با نرم افزار Excell نسخه ۲۰۰۷ رسم شدند. همچنین تفاوت تیمارهای مربوط به هشت دوره زمانی از نظر میزان فرآیندهای تخریب و پاشمان به روش آزمون دانکن بررسی شدند. همبستگی میزان تخریب و پاشمان با زمان و نیز همبستگی بین میزان پاشمان و تخریب با استفاده از توابع مختلف مورد بررسی قرار گرفت. برای انجام تحلیل داده‌ها از نرم‌افزار SPSS نسخه ۱۸ استفاده شد.

نتایج و بحث

نتایج حاصل از آزمایش‌های فیزیکی و شیمیایی خاک منطقه مورد مطالعه در جدول ۱ آورده شده است. بر اساس نتایج، خاک منطقه دارای بافت رسی بوده و در گروه

دقیق میزان تخریب خاکدانه‌ها تحت تأثیر ضربه قطرات باران بود. پیش از قرار دادن جعبه‌ها زیر باران، برای جمع‌آوری خاک پاشمان یافته، یک ورقه پلاستیکی در زیر و یک حفاظی از جنس گالوانیزه روی جعبه‌ها قرار داده شد تا ذرات خاک پاشمان یافته و خارج شده از سطح جعبه جمع‌آوری گردند (شکل ۳).

تعداد سه جعبه (به عنوان سه تکرار) در هر یک از رخدادهای بارندگی به مدت ۰/۷، ۱/۵، ۲/۵، ۳/۰، ۳/۷، ۴/۵ و ۵/۲ دقیقه زیر دستگاه شبیه‌ساز باران با شدت ثابت ۴۰ میلی‌متر بر ساعت و قطر قطره ۲/۵۱ میلی‌متر قرار گرفتند. زمان ۶۰ دقیقه (تیمار هشتم) از یک پیش آزمایش در جعبه‌های مشابه به دست آمد به طوری که تنها از این زمان به بعد تجمع آب باران در سطح خاک مشاهده شد. پس از اعمال هر تیمار زمانی بارندگی، میزان تخریب خاکدانه‌ها پس از هوا خشک شدن خاک داخل جعبه‌ها، از طریق اندازه‌گیری میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD) به روش الک خشک به دست آمد. برای این منظور نمونه‌های خاک هوا خشک به آرامی روی بالاترین سری الک (۲، ۴/۷، ۶/۲ و ۸ میلی‌متر) قرار داده شدند و به آرامی در جهت افقی حرکت داده شدند. مقدار MWD از رابطه زیر به دست آمد:

$$\sum_{i=1}^n W_i \cdot \bar{X}_i \text{ MWD}_{\text{dry}} = \text{رابطه (۱)}$$

که در آن: MWD میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (میلی‌متر)، \bar{X}_i میانگین قطر خاکدانه‌های روی هر الک، W_i نسبت وزن خاکدانه‌های روی هر الک به وزن کل خاکدانه‌های خاک و n تعداد الک بود. بر اساس قطر متوسط اولیه خاکدانه‌ها قبل از باران (۷ میلی‌متر) و تعیین قطر متوسط آنها (MWD) پس از برخورد قطرات باران، درصد تخریب خاکدانه‌ها از رابطه زیر به دست آمد:

رابطه (۲)

$$100 \times \left(1 - \frac{\text{قطر متوسط خاکدانه بعد از باران}}{\text{قطر متوسط خاکدانه قبل از باران}} \right) = \text{درصد تخریب خاکدانه}$$

برای تعیین میزان پاشمان در هر دوره زمانی بارندگی، ذرات خاک پاشمان یافته در اطراف هر جعبه به طور جداگانه، جمع‌آوری و پس از خشک شدن در آن وزن شدند (فرناندز-راگا و همکاران، ۲۰۰۹). به این ترتیب میزان فرآیندهای پاشمان و تخریب به طور جداگانه در هشت تیمار تداوم (زمان) بارندگی اندازه‌گیری شدند.

رسیده بود و تجمع آب در سطح خاک مشاهده نشد، میزان پاشمان بیشترین مقدار بود. با این وجود تفاوت معنی‌داری از نظر میزان پاشمان از زمان ۲۲/۵ دقیقه تا ۶۰ دقیقه مشاهده نشد. دلیل این مسئله این بود که با گذشت زمان به دلیل خیس شدن خاکدانه‌ها، میزان چسبندگی بین ذرات کاهش و در اثر تداوم ضربه قطرات باران، تخریب خاکدانه‌ها بیشتر شد و پاشمان ذرات افزایش یافت. در پژوهشی وانگمن و همکاران (۲۰۰۰) بیان کردند که با افزایش میزان رطوبت اولیه خاکدانه‌ها، مقاومت آنها در برابر ضربه قطرات باران به طور معنی‌داری کاهش و به دنبال آن فرسایش پاشمانی افزایش یافت.

نتایج نشان داد که رابطه مثبت معنی‌داری بین پاشمان ذرات خاک و تداوم بارندگی وجود داشت (شکل ۶). در پژوهشی کانگا (۱۹۹۹) با استفاده از باران‌ساز نشان داد که ضربه مستقیم قطرات، میزان پاشمان را افزایش داد که دلیل آن این بود که در اثر برخورد قطرات باران، ذرات از هم جدا شده و در ادامه به دلیل خیس شدن ذرات و کاهش چسبندگی آنها، انتقال ذرات به وسیله قطرات برگشت یافته از سطح تسهیل شده و به دنبال آن پاشمان افزایش یافت.

همانطور که شکل ۷ بررسی هم‌زمان فرآیندهای تخریب خاکدانه‌ها و پاشمان ذرات را نشان می‌دهد میزان تخریب و پاشمان در ابتدای زمان بارندگی پایین بود. در عین حال طی این زمان، میزان تخریب بیشتر از میزان پاشمان بود چرا که اولین پیامد برخورد قطرات باران بر سطح خاک، متلاشی کردن خاکدانه‌ها بود. از این رو در اوایل بارندگی سهم عمده انرژی قطرات صرف جداسازی ذرات از هم و تخریب خاکدانه‌ها شد. با تداوم بارندگی و برخورد بیشتر ضربات باران بر سطح خاکدانه‌ها و تأثیر توام افزایش رطوبت خاک، پاشمان ذرات خاک افزایش یافت. در زمان ۴۵ دقیقه، میزان تخریب خاکدانه‌ها و به دنبال آن میزان پاشمان ذرات خاک تقریباً به اوج رسید به طوری که در این زمان، ساختمان خاک سطحی کاملاً به هم ریخت و سله در سطح خاک مشاهده شد. تشکیل این توده در سطح خاک، از تخریب بیشتر خاکدانه‌های زیر سطحی، با گذشت زمان جلوگیری کرد. از این رو افزایش میزان تخریب خاکدانه‌ها از زمان ۴۵ دقیقه به بعد ناچیز بود. به طوری که میزان تخریب در زمان ۶۰ دقیقه نسبت به زمان ۴۵ دقیقه درصد بیشتر بود. میزان پاشمان ذرات نیز از زمان ۴۵ دقیقه به بعد هرچند افزایش قابل توجهی نداشت اما نسبت به میزان تخریب خاکدانه‌ها، کمتر تحت تأثیر قرار گرفت. به طوری که در زمان ۶۰ دقیقه نسبت به زمان ۴۵ دقیقه میزان پاشمان ۷ درصد بیشتر بود.

خاکهای آهکی - گچی قرار داشت. مقدار ماده آلی خاک پایین بود. بررسی میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها به روش الک تر (۰/۶۸ میلی‌متر) نیز نشان داد که خاک منطقه پایداری اندکی در برابر آب داشته و از این رو مقاومت کمتری در برابر عوامل فرساینده از جمله باران داشت. یکی از علل ناپایداری خاکدانه‌ها، وجود درصد بالای سدیم تبادل‌پذیر در خاک بود که باعث تضعیف خاکدانه‌ها و کاهش مقاومت آنها در روش الک تر شده بود.

بررسی آماری هشت تیمار تداوم بارندگی از نظر تأثیر بر فرآیندهای تخریب و پاشمان (جدول ۲) نشان داد که تداوم بارندگی اثری معنی‌دار بر میزان تخریب خاکدانه‌ها ($p < 0/01$) و پاشمان ذرات ($p < 0/05$) داشت. در حقیقت تداوم بارندگی از ویژگی‌های مهم باران از نظر تأثیر بر میزان تخریب خاکدانه‌ها و پاشمان ذرات خاک بود.

شکل ۳ تغییرات میزان تخریب خاکدانه‌ها را در تیمارهای مختلف زمان بارندگی (۷/۵ تا ۶۰ دقیقه) نشان می‌دهد. میزان تخریب خاکدانه‌ها در لحظات اولیه بارندگی نسبتاً کم بود. با گذشت زمان به دلیل افزایش رطوبت خاکدانه‌ها میزان چسبندگی ذرات نسبت به هم کاهش یافته و در اثر تداوم ضربه قطرات، تخریب آنها افزایش یافت. میزان تخریب خاکدانه‌ها در زمانهای انتهایی به صورت ناچیزی افزایش یافت. دلیل این مسئله این بود که در زمانهای انتهایی بارندگی، لایه سطحی خاکدانه‌ها کاملاً تخریب شده بود و این لایه تخریب یافته از برخورد قطرات باران بر لایه‌های زیرین و تخریب بیشتر آنها خودداری می‌کرد.

بررسی چگونگی تأثیر زمان بارندگی بر تخریب خاکدانه‌ها (شکل ۴) نشان داد که رابطه مثبت معنی‌داری بین میزان تخریب خاکدانه‌ها و تداوم (زمان) بارندگی وجود داشت ($R^2 = 0/99, p < 0/01$).

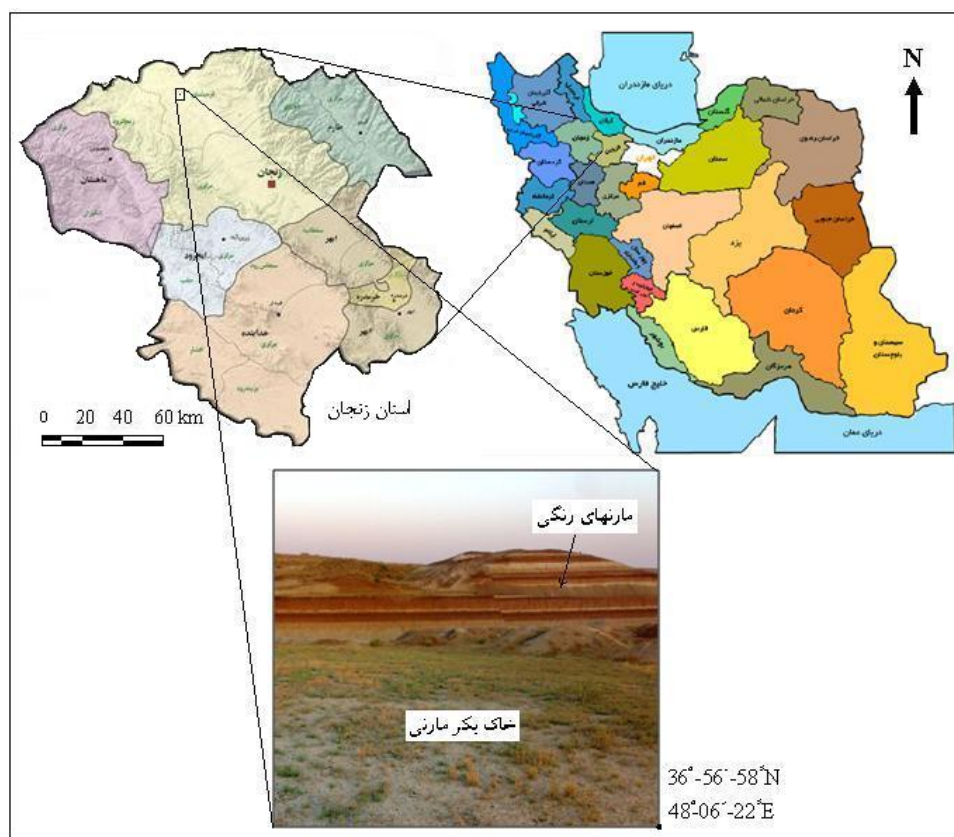
مقایسه میانگین اثر تیمارهای مختلف زمان بارندگی بر پاشمان ذرات خاک معنی‌دار ($p < 0/05$) بود (شکل ۵). نشان داد که میزان پاشمان ذرات در ابتدا به دلیل خشک بودن خاک و تأثیر اندک ضربه قطرات باران کم بود و با گذشت زمان بارندگی افزایش یافت. افزایش پاشمان از زمان ۱۵ تا ۲۲/۵ دقیقه به یکباره بیشتر شد. هرچند این تفاوت معنی‌دار نبود اما در حقیقت زمان ۲۲/۵ دقیقه آستانه تخریب کامل خاکدانه‌ها در خاک مارنی تحت شدت بارندگی ۴۰ میلی‌متر بر ساعت بود. میزان پاشمان از زمان ۲۲/۵ دقیقه به بعد با روندی تقریباً یکسان افزایش یافت. در پژوهشی فرناندز - راگا و همکاران (۲۰۰۹) نشان دادند که با افزایش انرژی جنبشی قطرات باران و تداوم بارندگی، فرسایش پاشمانی به صورت خطی افزایش یافت. در زمان ۶۰ دقیقه از آنجا که میزان تخریب خاکدانه‌ها به حداکثر

در میزان وقوع فرآیندهای تخریب خاکدانه و پاشمان ذرات می‌باشد. با شروع بارندگی، ابتدا (در زمان ۷/۵ دقیقه) میزان فرآیند تخریب بیشتر از فرآیند پاشمان بود و با تداوم بارندگی به دلیل تخریب بیشتر خاکدانه‌ها و مرطوب شدن آن‌ها، میزان پاشمان نیز افزایش یافت و روند افزایشی آن به منحنی تخریب نزدیک شد. در زمان ۴۵ دقیقه، میزان تخریب خاکدانه‌ها و به دنبال آن میزان پاشمان ذرات خاک تقریباً به اوج رسید به طوری که در این زمان سله در سطح خاک نمایان شد و پس از آن میزان تخریب و پاشمان افزایش ناچیزی نشان دادند. هر دو فرآیند تخریب و پاشمان به عنوان متغیرهایی وابسته به زمان با روابط توانی بیان شدند. بین میزان پاشمان ذرات خاک و تخریب خاکدانه‌ها رابطه مثبت معنی‌داری ($R^2=0/98$, $p<0/05$) وجود داشت. در حقیقت تخریب خاکدانه‌ها در اثر ضربه مکانیکی قطرات باران و خیس شدن فیزیکی آنها دلیل اصلی وقوع فرآیند پاشمان ذرات می‌باشد.

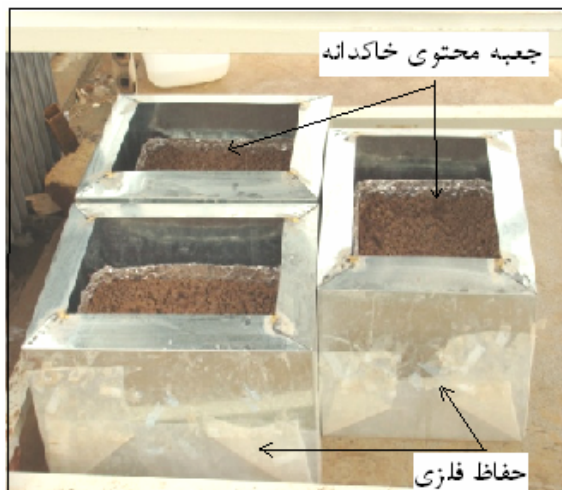
بررسی رابطه بین تخریب خاکدانه‌ها و پاشمان ذرات خاک (شکل ۸) نشان داد که با افزایش تخریب خاکدانه‌ها، میزان پاشمان به طوری معنی‌دار ($p<0/05$, $R^2=0/98$) افزایش یافت. در حقیقت با افزایش میزان تخریب خاکدانه‌ها به دلیل جدا شدن ذرات از هم و کاهش چسبندگی بین ذرات، میزان پاشمان افزایش یافت. در ابتدا به دلیل کم بودن میزان تخریب، میزان پاشمان نیز به مراتب کم بود. در زمان ۲۲/۵ دقیقه همزمان با افزایش سریع تخریب خاکدانه‌ها، پاشمان ذرات نیز به سرعت بالا رفت. اما با گذشت زمان بارندگی و خیس شدن خاکدانه‌ها و افزایش تخریب آن‌ها، میزان پاشمان در زمان‌های انتهایی نیز بیشتر شد.

نتیجه‌گیری

بررسی تغییرات زمانی فرآیندهای تخریب خاکدانه و پاشمان ذرات خاک تحت تأثیر باران شبیه‌سازی شده نشان داد که تداوم بارندگی، مشخصه مهمی از باران



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی و نمایی از خاک بکر منطقه مورد مطالعه



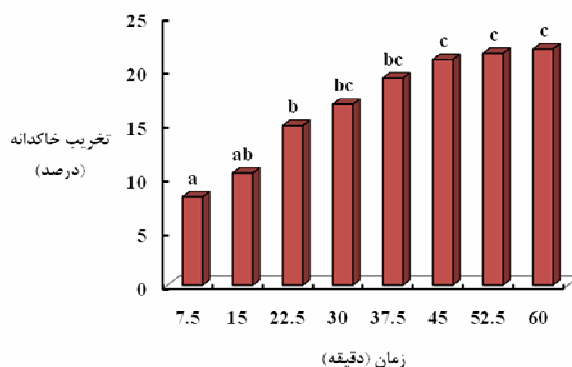
شکل ۲- جعبه‌های خاک و حفاظ پیرامون آن برای اندازه‌گیری پاشمان

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

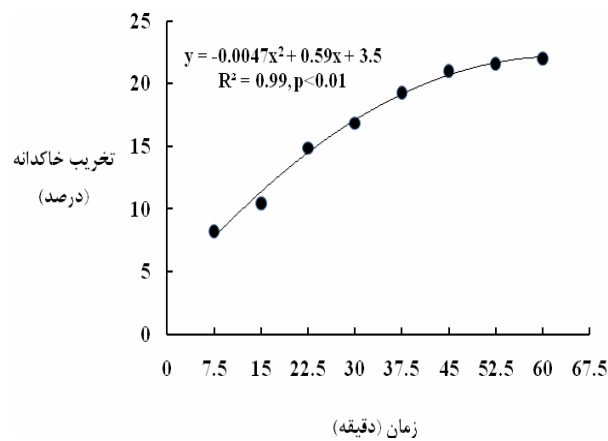
ویژگی خاک	شن (درصد)	سیلت (درصد)	رس (درصد)	ماده آلی (درصد)	آهک (درصد)	گچ (درصد)	واکنش خاک	هدایت الکتریکی (دسی زیمنس بر متر)	درصد سدیم تبادل	میانگین وزنی قطر خاکدانه (میلی متر)
میانگین	۲۰	۱۷/۵	۶۲/۵	۱/۲۸	۱۶/۰۸	۱۱/۶۸	۷/۵۴	۱/۴۸	۹/۶۶	۰/۶۸
انحراف معیار	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۹	۰/۳۶	۰/۱۵	۰/۰۱	۰/۵۴	۰/۱۷	۰/۰۲

جدول ۲- تجزیه واریانس اثر تیمارهای زمان بارندگی بر تخریب خاکدانه‌ها و پاشمان ذرات

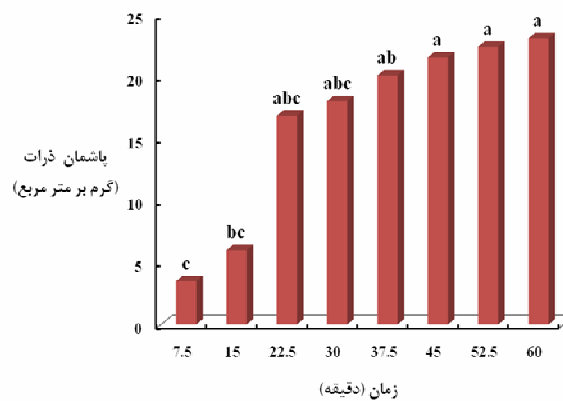
منبع تغییر	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F	سطح معنی‌داری
تخریب خاکدانه	۷۶۹/۵۶۵	۷	۹/۱۹	۸/۶۹	۰/۰۰۲
پاشمان ذرات	۲۰/۲۵۵	۷	۲/۵۳۲	۵/۰۸۹	۰/۰۱۳



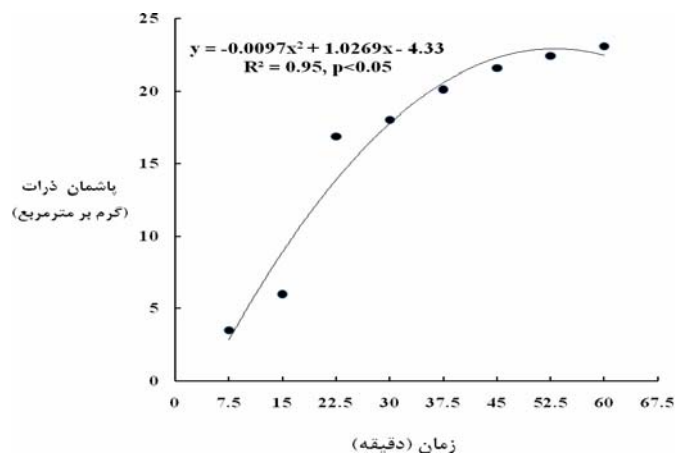
شکل ۳- اثر تیمارهای مختلف زمان بارندگی بر تخریب



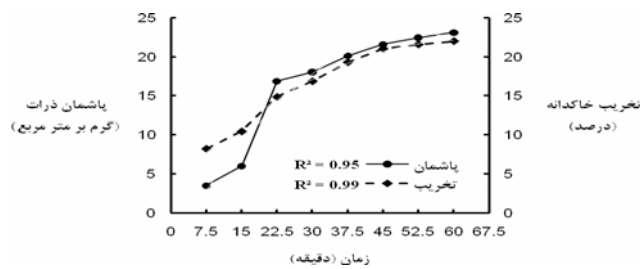
شکل ۴- رابطه بین تخریب خاکدانه و مدت بارندگی در خاک مارنی



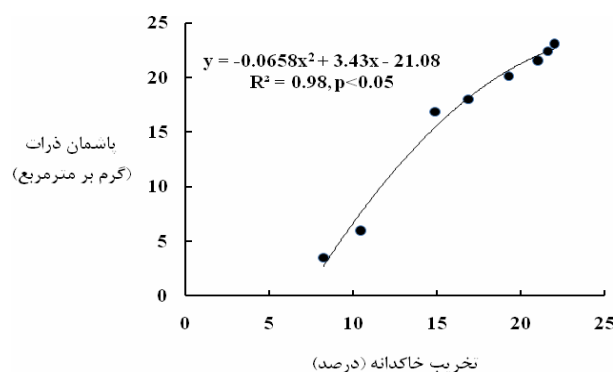
شکل ۵- اثر تیمارهای مختلف زمان بارندگی بر پاشمان ذرات خاک



شکل ۶- رابطه بین پاشمان ذرات خاک و زمان بارندگی در خاک مارنی



شکل ۷- تغییرات زمانی فرآیند تخریب خاکدانه و پاشمان ذرات



شکل ۸- رابطه بین پاشمان ذرات و تخریب خاکدانه‌ها تحت تأثیر زمان بارندگی

فهرست منابع:

۱. آزموده، ع. کاویان، ع. سلیمانی، ک. و وهاب زاده، ق. ۱۳۸۹. مقایسه میزان رواناب و فرسایش در خاکهای تحت پوشش کاربری های جنگل، زراعی و باغ با استفاده از شبیه ساز باران. مجله آب و خاک، جلد ۲۴، شماره ۳، صفحه ۴۹۰-۵۰۰.
۲. بافکار، ع. و مجردی، ح. ۱۳۸۵. حفاظت آب و خاک. انتشارات دانشگاه رازی، صفحه ۱۱ تا ۳۵.
۳. پیروان، ح و اسدی، ت. ۱۳۸۴. مروری بر نقش عوامل فیزیکی- شیمیایی موثر بر اشکال فرسایش در پهنه‌های مارنی. نهمین کنگره علوم خاک ایران، کرج، ۶ تا ۹ شهریور، صفحه ۵۶۰ تا ۵۶۲.
۴. تمرتاش، ر. ریحانی، ب. طاطیان، م. و رضایی پاشا، م. ۱۳۸۶. مطالعه ارتباط خصوصیات شیمیایی خاکهای مارنی با پوشش گیاهی در شهرستان بیرجند. مجموعه مقالات دهمین کنگره علوم خاک ایران، کرج ۴ تا ۶ شهریور، صفحه ۲۴۶.
۵. خالدیان، ح. ۱۳۸۶. اندازه گیری فرسایش پاشمانی با استفاده از کاسه پاشمان. مجموعه مقالات دهمین کنگره علوم خاک ایران، ص ۱۱۹۰.
۶. رفاهی، ح. ۱۳۸۵. فرسایش آبی و کنترل آن. چاپ پنجم، انتشارات دانشگاه تهران، صفحه ۲۷-۱۳۲.
۷. زنگی آبادی، م. رنگ آور، ع. رفاهی، ح. ق. شرفا، م. و بی همتا، م. ۱۳۸۹. بررسی مهمترین عوامل تأثیرگذار بر فرآیند فرسایش خاک در مراتع نیمه خشک کلات. مجله آب و خاک، جلد ۲۴، شماره ۴، صفحه ۷۳۷-۷۴۴.
۸. سازمان جهاد کشاورزی استان زنجان. ۱۳۸۱. مدیریت آبخیزداری، طرح مطالعات تفصیلی- اجرایی حوزه آبخیز سرچم استان زنجان.

۹. شهبازی، ع. یزدی‌پور، ع. و رئوفی، م. ۱۳۸۸. بررسی تأثیر پلی‌اکریل‌آمید بر برخی خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک و ظهور جوانه‌های کلزا در خاک مستعد تشکیل سله. مجله آب و خاک، جلد ۲۳، شماره ۲، صفحه ۳۸-۴۵.
۱۰. علی‌رضایی، ح. ۱۳۸۴. طرح طبقه‌بندی مرفوکلیماتیک آبکندهای استان همدان، سازمان تحقیقات و آموزش کشاورزی، وزارت جهاد کشاورزی، طرح با کد ۸۲-۰۵۰۱۲۲۰۰۰-۰۲
۱۱. واعظی، ع. بهرامی، ح. صادقی، ح. و مهدیان، م. ۱۳۸۶. بررسی ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی موثر بر پایداری خاکدانه در خاکهای آهکی. مجموعه مقالات دهمین کنگره علوم خاک ایران، کرج، ۶ تا ۹ شهریور، صفحه ۹۸۰
12. 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.
13. Canga, M.R. 1999. Effects of subsequent simulated rainfall on runoff and erosion *Tr.T.of Agriculture and Forester*. 23: 659.665.
14. Day, R. 1965. Particle fractionation and particle size analysis. In: C.A. Black et al (ed). *Methods of soil analysis*. Part 1. P: 595-566. Ser. No 9. ASA. Madison.WS.
15. Fernandez-Raga, M, Fraile, R, Keizer, J, Eufemia, M and Castro, A. 2009. The Kinetic energy of rain measured with an optical disdrometer: An application to splash erosion in Leon (Spain). *Atmosphere Researchs* 93: 619-635.
16. Flanagan, D. 2002. In: Lal, R. (Ed.), *Erosion Encyclopedia of Soil Science*. Marcel Dekker, New York, pp. 395-398.
17. Giovannini, G, Valijo, R, Lucchesi, S, Bautista, S, Ciompi, S and Liovet, J. 2001. Effects of land use and eventual fire on soil erodibility in dry Mediterranean condition. *Forest Ecology and Management* 147: 15-23
18. Jin, K, Cornelis, W.M, Gabriels, D. 2008. Soil management effects on runoff and soil loss from field rainfall simulation. *Catena* 75: 191-199.
19. Julien, P. Y. 1995. *Erosion and sedimentation*. Cambridge University Press, 280 p.
20. Kemper, W.D and Rosenau, R. 1986. Aggregate stability and size distribution. In: Klute A. (ed). *Methods of soil Analysis*. Part 1. Physical and Mineralogical Methods.
21. Legout, C., Legue'dois, S., Le Bissonnais, Y and Malam Issa, O. 2005. Splash distance and size distributions for various soils. *Geoderma* 124: 279-292.
22. Page, M.C, Sprrks, D.L, Noll, M.R. 1987. Kinetics and mechanisms of potassium release from sandy middle Atlantic coastal. Plain soils. *Soil Science Socince of America Journal* 51: 1460-1465.
23. Ruiz-Sinoga, J.D and Romero-Diaz, A. 2010. Soil degradation factors along a Mediterranean pluviometric gradient in southern Spain. *Geomorphology* 118(3-4): 359-368.
24. Steiner, K.G. 1996. Causes of soil degradation and development approaches to sustainable soil management. (English version by Richard Williams). CTZ, Margraf Verlag.
25. USDA. 1972. Soil survey laboratory methods and procedures for collecting soil samples. Report No 1: 63 pp.
26. Valettea, S., Prevosta, Laurent, L., Lucasa., J. 2006. SoDA project: A simulation of soil surface degradation by rainfall. *Gilles Computers & Graphics* 30: 494-506
27. van Dijk, A.I.J, Meesters, A.G.C and Bruijnzeel, L.A. 2002. Exponential distribution theory and the interpretation of splash detachment and transport experiments. *Soil Science Society of America Journal* 66: 1466-1474.
28. Walkly, A., and Black, I.A. 1934. An examination of digestion methods for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic and titration. *Soil Science Society of America Journal*. 37: 29-38.

29. Wangemann, S. G., Kohl, R. A. and Molumeli, P. A. 2000. Infiltration and percolation influenced by antecedent soil water content and air entrapment. *Trans. ASAE* 43:1517–1523.
30. Yoder, R. E. 1936. A direct method of aggregate analysis and a study of a physical nature of erosion losses. *Journal of American Agronomy*, 28: 337-351.
31. Zheng, F.L. 2005. Effects of accelerated soil erosion on soil nutrient loss after deforestation on the loess plateau. *Pedosphere* 15(6): 707-715.