

بررسی فرایندهای فرسایش بارانی در خاکدانه‌ها تحت شرایط آزمایشگاهی در خاک‌های آهکی شمال غرب زنجان

علی‌رضا واعظی^{۱*}، سعیده اکبری^۲ و محمدحسین محمدی^۳

۱. و ۳. دانشیار و ۲. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه خاک‌شناسی دانشکده کشاورزی دانشگاه زنجان

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۶/۲۸ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۲/۷/۸)

چکیده

فرایندهای فرسایش بارانی در کنار ویژگی‌های باران تحت‌تأثیر مقاومت خاکدانه‌ها نیز قرار می‌گیرند. این پژوهش به‌منظور بررسی حساسیت خاکدانه‌ها در خاک‌های با بافت مختلف به فرایندهای فرسایش بارانی انجام گرفت. آزمایش در ۳۰ نمونه خاک با چهار گروه بافتی و با تکرارهای متفاوت انجام شد. برای این منظور ۹۰ جعبه محتوی خاکدانه‌های ۶ تا ۸ میلی‌متر تهیه و به مدت ۳۰ دقیقه زیر دستگاه شبیه‌ساز باران قرار گرفتند. نتایج نشان داد که تفاوتی معنادار بین بافت‌های مختلف از نظر میزان تخریب خاکدانه ($P < 0/0001$)، تراکم خاک ($P < 0/001$) و پاشمان ذرات ($P < 0/01$) وجود دارد. بیشترین تخریب خاکدانه در خاک‌های شن‌لومی و بیشترین تراکم خاک و پاشمان در خاک‌های لومرسی مشاهده شد. تخریب خاکدانه تحت‌تأثیر منفی درصد ذرات سیلت ($r = 0/63$ $P < 0/01$) و رس ($r = 0/70$ $P < 0/01$) قرار گرفت. با وجود این، تراکم خاک و پاشمان به‌شدت تحت‌تأثیر درصد ذرات سیلت و رس افزایش یافت. چگونگی تأثیر ذرات شن بر فرایندهای فرسایش بارانی برخلاف ذرات (سیلت و رس) دیگر بود.

کلیدواژگان: پاشمان ذرات خاک، تخریب خاکدانه، تراکم خاک، فرسایش بارانی.

مقدمه

فرسایش بارانی یا فرسایش پاشمانی یکی از انواع فرسایش آبی است که بر اثر برخورد قطرات باران به سطح خاک به وجود می‌آید. از جمله فرایندهای فرسایش بارانی که بر اثر برخورد قطرات باران بر سطح خاک ایجاد می‌شود تخریب، تراکم و پاشمان خاک است (Barthes and Roose, 2002). اولین پیامد برخورد قطرات باران بر سطح خاک، تخریب خاکدانه‌ها است. مقدار خاکدانه‌های تخریب‌شده به استحکام نیروهای چسبنده و نگهدارنده ذرات به یکدیگر و بزرگی نیروهای تخریب‌کننده بستگی دارد (Mbagwu and Bazzoffi, 1998). تراکم خاک از جمله شاخص‌های نشان‌دهنده تخریب فیزیکی ساختمان خاک است که قطرات باران نقشی مؤثر در بروز آن دارند. تراکم خاک عبارت از کاهش حجم خاک غیراشباع، تحت‌تأثیر یک نیروی خارجی است (Kinnell, 2005). زمانی که خاک متراکم می‌شود تخلخل خاک کاهش می‌یابد و خصوصیات فیزیکی مثل مقدار آب و پایداری خاکدانه تغییر می‌یابند، در نتیجه رشد و توسعه ریشه تحت‌تأثیر قرار می‌گیرد. برخورد قطرات باران با انرژی بالا

بر روی خاک سبب پرتاب ذرات خاک همراه با آب به هوا می‌شود که به آن پاشمان گفته می‌شود (Saint-Jean *et al.*, 2004). فرایندهای فرسایش بارانی تحت‌تأثیر عوامل مختلفی مانند ویژگی‌های باران، ویژگی‌های خاک، شرایط سطح زمین و پوشش سطح خاک قرار می‌گیرند. ویژگی‌های خاک مانند فراوانی ذرات خاک، اندازه، درصد و پایداری خاکدانه‌ها در میزان وقوع فرایندهای فرسایش بارانی نقشی مهم دارند. توزیع اندازه ذرات خاک (PSD) یکی از ویژگی‌های مهم فیزیکی خاک به شمار می‌رود. این ویژگی می‌تواند شاخص مناسبی برای تشخیص حساسیت خاک در برابر تشکیل سله، تولید رواناب و فرسایش آبی باشد (Barthes *et al.*, 2008).

بررسی‌های مختلفی درباره تأثیر ویژگی‌های باران و خاک بر وقوع فرسایش بارانی انجام گرفته است. در برخی پژوهش‌ها تأثیر انرژی جنبشی باران بر تخریب خاکدانه‌ها، پاشمان ذرات و تراکم خاک بررسی شده است. با افزایش میزان انرژی جنبشی قطرات باران، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها به‌طور معناداری کاهش و به دنبال آن میزان تخریب آن‌ها افزایش می‌یابد (Valettea *et al.*, 2006). از سوی دیگر قطرات باران با افزایش مقدار رطوبت خاک، میزان تخریب‌پذیری خاک را افزایش می‌دهند (Ruiz-Sinoga and Romero-Diaz, 2010). فرسایش

مواد و روش‌ها

منطقه نمونه‌برداری خاک

منطقه نمونه‌برداری واقع در ۱۵ کیلومتری شمال غرب زنجان، در حوزه آبخیز تهم چای واقع بود. این پژوهش در سال ۱۳۹۰ انجام شد. میانگین متوسط درجه حرارت سالانه ۱۰/۹ درجه سانتی‌گراد و میانگین بارندگی سالانه ۲۷۶/۴ میلی‌متر گزارش شده است. به‌طور کلی قسمت عمده اراضی مطالعه‌شده بر روی واحد فیزیوگرافی دشت‌های مرتفع قدیمی قرار داشته و جزء خاک‌های آهکی به شمار می‌روند. این اراضی به کشت غلات دیم به‌ویژه گندم اختصاص دارند (Zanjan Water Organization, 2011). برای انجام این پژوهش نمونه‌های خاک از ۳۰ دیمزار گندم تحت آیش در شمال غرب زنجان در محدوده جغرافیایی ۵۸' و ۴۷' و ۳۶° و عرض شمالی و ۴۵" و ۳۲' و ۴۸° طول شرقی جمع‌آوری شد. اساس انتخاب دیمزارها، وجود تفاوت‌های اولیه در بافت خاک در آن‌ها بود. مختصات جغرافیایی ۳۰ نقطه به‌وسیله دستگاه مکان‌یاب جهانی (GPS) تعیین شد. شکل ۱ موقعیت نقاط نمونه‌برداری خاک در منطقه بررسی‌شده را نشان می‌دهد.

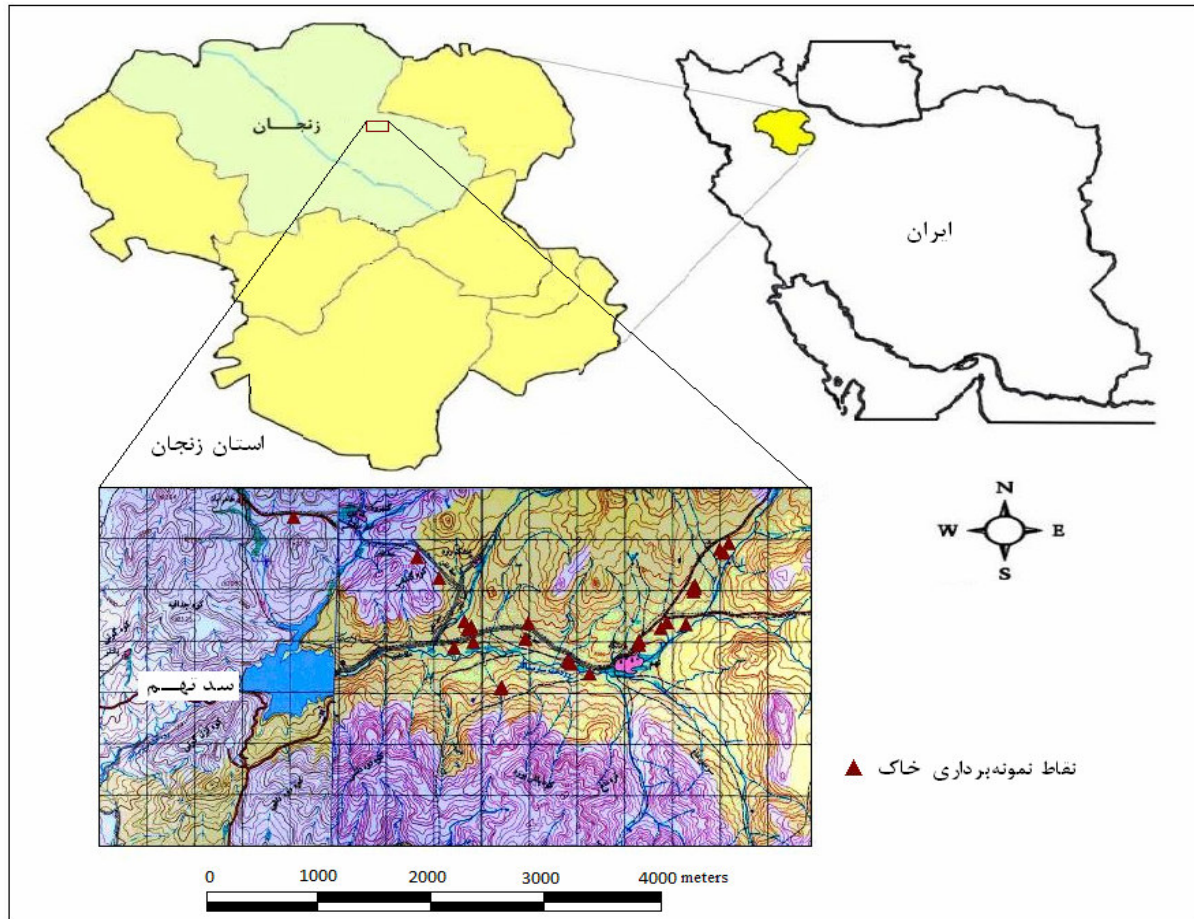
برای نمونه‌برداری خاک ۹۰ جعبه حاوی خاکدانه‌های با قطر ۶ تا ۸ میلی‌متر تهیه شد. برای این منظور جعبه‌های پلاستیکی مسطح و نفوذپذیر با ابعاد ۳۰ × ۲۴ سانتی‌متر و ارتفاع ۶ سانتی‌متر به منطقه نمونه‌برداری منتقل شدند. دیواره جعبه‌ها بدون منفذ و قطر سوراخ کف آن‌ها کمتر از دو میلی‌متر بود. ابتدا کف جعبه‌ها با توری پوشانده شد. برای زهکشی بهتر خاک، کف جعبه‌ها با لایه‌ای از شن به ضخامت دو سانتی‌متر پوشانده شد. نمونه‌های خاکدانه با قطر بین ۶ تا ۸ میلی‌متر از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متر با استفاده از الک‌های مربوطه جمع‌آوری شد و به‌آرامی داخل جعبه‌ها قرار داده شد. اگرچه از خاکدانه‌های با قطر پایین‌تر (معمولاً بین ۲ تا ۴ میلی‌متر) در بررسی پایداری خاکدانه‌ها در آب نیز استفاده می‌شود (Fattet et al., 2011) لیکن پیش‌آزمایش در خاکدانه‌های با قطر پایین‌تر نشان داد که طی رخدادهای بارندگی اغلب خاکدانه‌ها بر اثر ضربه قطرات باران متلاشی می‌شوند و از این‌رو تفاوتی بین خاکدانه‌های خاک‌های مختلف از نظر مقاومت در برابر باران آشکار نمی‌شود. بنابراین، خاکدانه‌هایی با قطر ۶ تا ۸ میلی‌متر به‌دلیل امکان بررسی تفاوت خاکدانه‌های خاک‌های مختلف از نظر فرایندهای فرسایش بارانی در رخدادهای مختلف باران مورد توجه قرار گرفت. برای تعیین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی هر خاک، سه

پاشمانی نیز به‌شدت تحت تأثیر ویژگی‌های باران قرار می‌گیرد. در مطالعه‌ای نشان داده شد با افزایش انرژی جنبشی و قطر متوسط قطرات باران، فرسایش پاشمانی به‌صورت خطی افزایش یافت (Fernandez-Raga et al., 2010). برخی یافته‌ها نیز نشان می‌دهد که میزان پاشمان ذرات پیش از آن که تحت تأثیر نوع خاک قرار بگیرد به‌شدت تحت تأثیر فرسایش باران (EI_{30}) قرار دارد (Angulo-Martínez et al., 2012). پدیده‌هایی مانند سله و تراکم خاک نیز به‌شدت تحت تأثیر ضربه قطرات باران قرار می‌گیرند (Neave and Rayburg, 2007). با وجود آنچه در پژوهش‌های بالا بیان شد، فرایندهای فرسایش بارانی در کنار ویژگی‌های باران تحت تأثیر نوع خاک نیز قرار می‌گیرند (Bisal, 1960). باین‌حال مطالعات دقیق و گسترده‌ای در این مورد انجام نگرفته است. برخی مطالعات نشان می‌دهد که میزان تخریب خاک بر اثر باران به‌نوبه خود به میزان شن و ماسه بستگی دارد (Mbagwu and Bazzoffi, 1998). ذرات سیلت نیز در مقاومت خاکدانه‌ها در برابر باران مهم هستند. خاک‌هایی که میزان سیلت بالاتری دارند، پایداری کمتری دارند (Ramos et al., 2003). بیشترین پاشمان در ذرات با قطر بین ۱۰۰ تا ۲۰۰ میکرون رخ می‌دهد (Legout et al., 2005). عواملی مانند درصد رس، میزان مواد آلی، مقدار سدیم و میزان نمک‌های محلول خاک در وقوع پاشمان مؤثر هستند. به‌طور کلی، نیروی برشی خاک بیشترین همبستگی را با میزان پاشمان خاک دارد (AL-Durrah, 1982).

با آن‌که پژوهش‌های متعددی درباره اثر ویژگی‌های خاک بر فرسایش پاشمانی در سراسر دنیا انجام گرفته است، غالب پژوهش‌ها در خاک‌های متفاوت از خاک‌های نواحی نیمه‌خشک انجام گرفته است. پایین‌بودن مقدار ماده آلی و وجود میزان بالایی از کربنات‌ها از جمله ویژگی‌های رایج خاک‌های نواحی نیمه‌خشک هستند که نقشی اساسی بر خصوصیات مختلف خاک به‌ویژه از دیدگاه فیزیکی مانند پایداری خاکدانه‌ها و مقاومت آن‌ها در برابر باران ایفا می‌کنند. با توجه به گستردگی سطح این خاک‌ها در کشور بررسی فرایندهای فرسایش بارانی در آن‌ها حائز اهمیت است. از سوی دیگر تا کنون فرایندهای تخریب، تراکم و پاشمان به‌عنوان فرایندهای اصلی فرسایش بارانی، به‌طور هم‌زمان در خاک‌های با بافت مختلف بررسی نشده است، از این‌رو این پژوهش به‌منظور بررسی حساسیت خاکدانه‌ها در برخی خاک‌های آهکی نواحی نیمه‌خشک به فرایندهای فرسایش بارانی انجام گرفت.

که خاکدانه‌های خاک‌های بررسی شده در چهار گروه بافتی شامل لومرسی (۱۰ نمونه)، لومشنی (۹ نمونه)، لومرسشنی (۹ نمونه) و شن لومی (۲ نمونه) قرار داشتند.

نمونه مرکب از خاکدانه‌ها پس از کوبیدن، از الک دو میلی‌متری عبور داده و به آزمایشگاه منتقل شد. بررسی‌های اولیه بافت خاک به روش هیدرومتری (Gee and Bauder, 1979) نشان داد



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی نقاط نمونه‌برداری شده بر روی نقشه توپوگرافی منطقه مطالعه‌شده

قادر به تولید باران‌هایی با شدت متغیر (از ۴۰ تا ۱۲۰ میلی‌لیتر بر ساعت) بود. آب تحت فشار ثابت از داخل تانک آب به صفحه بارش وارد شده و به طور یکنواخت بر سطح خاک تحت آزمایش اعمال شد. از آنجا که باران‌ساز استفاده‌شده در این پژوهش از نوع قطره‌ساز با متوسط قطر قطره $2/63$ میلی‌متر بوده استفاده از باران‌هایی با شدت پایین‌تر منجر به غیر یکنواختی در توزیع شدت باران در سطح صفحه بارش می‌شد. یک سینی گالوانیزه در زیر جعبه‌ها و یک حفاظ از همان جنس بر روی جعبه‌ها قرار داده شد (شکل ۲- الف). پس از اعمال هر رخداد بارندگی برای بررسی میزان تخریب خاکدانه و تراکم خاک، در سطح جعبه‌ها چهار قسمت به ابعاد 10×10 سانتی‌متر در نظر گرفته شده و پس از پایان هر رخداد بارندگی و بعد از خشک شدن سطح خاک از یکی از قسمت‌ها، نمونه خاک با سیلندر برداشت شد (شکل ۲- ب).

بررسی فرایند تخریب، تراکم و پاشمان

فرایندهای فرسایش بارانی در نمونه‌های خاکدانه تهیه‌شده در سه تکرار در قالب طرح کاملاً تصادفی در آزمایشگاه بررسی شدند. آزمایش در چهار رخداد بارندگی در سه تکرار (تعداد سه جعبه) انجام گرفت. برای این منظور نمونه‌های خاکدانه تحت باران شبیه‌سازی شده با شدت ثابت ۶۰ میلی‌متر بر ساعت به مدت ۳۰ دقیقه قرار گرفتند. انتخاب این محدوده شدت از آنجا بود که براساس تحلیل داده‌های ایستگاه باران نگاری موجود در منطقه، وقوع چنین بارانی‌هایی به‌ویژه در اوایل پاییز به هنگام عملیات خاکورزی و کاشت در دیمزارها در منطقه محتمل است و از سوی دیگر در این محدوده شدت بارندگی امکان ایجاد باران یکنواخت در سطح صفحه بارش در دستگاه باران‌ساز فراهم بود. برای ایجاد چنین باران‌هایی از یک دستگاه شبیه‌ساز باران به ارتفاع ۲۸۷ سانتی‌متر با صفحه بارشی به ابعاد $90 \text{ cm} \times 128$ مشتمل بر ۵۰۰ قطعه نازل استفاده شد. دستگاه مذکور



(ب)



(الف)

شکل ۲. جعبه‌های حاوی خاکدانه و حفاظ پیرامون آن برای اندازه‌گیری پاشمان (الف) نمونه‌های برداشته‌شده به وسیله سیلندر برای اندازه‌گیری تخریب و تراکم خاک (ب)

سینی زیر آن جمع‌آوری و پس از خشک‌شدن در آن توزین شدند.

اندازه‌گیری ویژگی‌های خاک

واکنش خاک در گل اشباع با استفاده از pH متر، هدایت الکتریکی در عصاره گل اشباع با استفاده از EC متر، ماده آلی خاک به روش احتراق مرطوب (Walkly and Black, 1934)، درصد کربنات کلسیم معادل به روش خنثی‌سازی با استفاده از اسیدکلریدریک نرمال (Page et al., 1987) و درصد سدیم تبادل (ESP) به روش استات آمونیوم اندازه‌گیری شد. پایداری خاکدانه‌ها در آب به روش الک تر (Yoder, 1936) در خاکدانه‌های با قطر ۶ تا ۸ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. برای این منظور مقدار خاکدانه‌های پایدار پس از گذاشتن روی سری الک‌ها (۰/۵، ۱/۱۸، ۲، ۴، ۶، ۰/۲۵ میلی‌متر) و حرکت دادن آن‌ها با دستگاه مکانیکی به مدت یک دقیقه درون آب مقطر اندازه‌گیری شد. زمان یک دقیقه بر مبنای یک پیش‌آزمایش روی خاکدانه‌ها به دلیل حساسیت بالای خاکدانه‌ها به تخریب در آب در نظر گرفته شد. با استفاده از رابطه ۱ و ۲ میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های پایدار به دست آمد.

تجزیه و تحلیل داده‌ها

داده‌های به‌دست‌آمده قبل از انجام تجزیه و تحلیل از نظر توزیع نرمال به روش هیستوگرام با تحلیل چولگی و کشیدگی توزیع داده‌ها بررسی شدند. فرایندهای تخریب، تراکم و پاشمان به‌عنوان متغیرهایی وابسته به بافت خاک با استفاده از آزمون دانکن بررسی شدند. همبستگی بین فرایندهای فرسایش بارانی و نوع ذرات خاک (شن، سیلت و رس) به روش پیرسون بررسی شد. برای انجام تحلیل داده‌ها از نرم‌افزار SPSS نسخه ۱۹ استفاده شد.

خاک داخل سیلندر، از سری الک‌ها (۰/۵، ۱/۱۸، ۲، ۴، ۶) از سری الک‌ها (۰/۵ و ۰/۲۵ میلی‌متر) در حالت خشک به روش دستی عبور داده شد. خاک قرار گرفته روی هر الک پس از خشک‌شدن در آن وزن شده و مقدار ذرات سنگریزه آن نیز جداگانه وزن شد. با استفاده از وزن خاکدانه‌های هر بخش، میانگین وزنی قطر خاکدانه (MWD) با استفاده از رابطه زیر تعیین شد:

$$\text{MWD} = \sum W_i \cdot X_i \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در آن: X_i : میانگین قطر خاکدانه‌های روی هر الک، W_i : نسبت وزن خاکدانه‌های روی هر الک به وزن کل خاکدانه‌های خاک، n : تعداد الک، نسبت وزن خاکدانه‌ها به کمک رابطه زیر محاسبه شد:

$$W_i = \frac{w_i(a+s) + w_i(s)}{\sum_{i=1}^n w_i(a+s) - \sum_{i=1}^n w_i(s)} \quad (\text{رابطه ۲})$$

که در آن: $W_i(a+s)$: وزن توده خاک باقی مانده پس از آزمایش روی هر الک (خاکدانه باقی‌مانده + شن) و $W_i(s)$: وزن شن روی هر الک پس از گذراندن از الک (۰/۰۵ میلی‌متر (گرم) است (Yoder, 1936). خاک عبور یافته از پایین‌ترین الک (۰/۲۵ میلی‌متر) نیز مطابق با بخش‌های بالاتر در محاسبات منظور شد. برای تعیین تراکم خاک بر اثر هر رخداد باران، قطعه‌ای از سله سطح خاک که به شکل ساختمان توده‌ای قابل جدا شدن از ساختمان خاکدانه‌ای پایین‌تر بود، برداشت شد (حداکثر تا ضخامت ۲ میلی‌متر) و پس از خشک‌کردن در آن (۱۰۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت) حجم آن به روش پارافین اندازه‌گیری شد و به این ترتیب جرم مخصوص ظاهری سله به دست آمد. تراکم خاک بر مبنای تغییرات جرم مخصوص ظاهری خاک قبل و پس از باران به دست آمد. برای تعیین میزان پاشمان ذرات، ذرات خاک پاشمان‌یافته بر روی حفاظ گالوانیزه و

نتایج و بحث

درصد بود و پایداری خاکدانه به روش الک تر برای این دو نمونه خاک به ترتیب ۱/۸۷ و ۰/۹۳ میلی-متر بود. از آنجا که با افزایش ماده آلی پایداری خاکدانه افزایش یافت، این گروه با داشتن خاکی با ماده آلی نسبتاً بالا بیشترین پایداری خاکدانه را به خود اختصاص داد.

بررسی حساسیت خاکدانه‌ها (۶ تا ۸ میلی-متر) در نمونه خاکدانه خاک‌های بررسی‌شده از نظر فرایندهای تخریب، تراکم و پاشمان (جدول ۲) نشان داد که تفاوتی معنادار بین خاک‌های با بافت مختلف از نظر میزان تخریب خاکدانه‌ها ($P < 0.001$)، تراکم خاک ($P < 0.001$) و پاشمان ذرات ($P < 0.01$) وجود داشت. مقاومت خاکدانه‌ها در برابر ضربه مکانیکی قطرات باران و تأثیر فیزیکی جذب آب در خاکدانه‌ها دلیل ایجاد تفاوت بین خاک‌ها از نظر فرایندهای فرسایش بارانی بود.

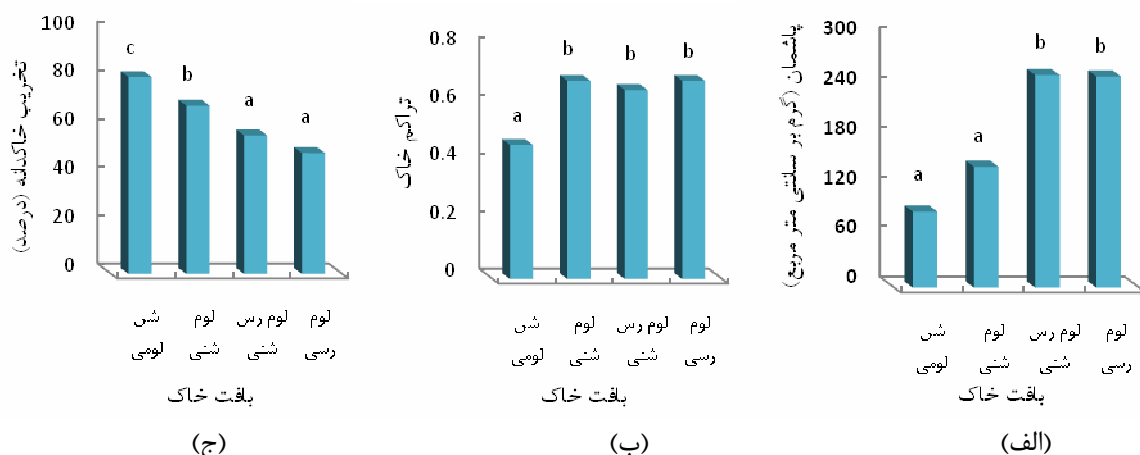
ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مطالعه‌شده در جدول ۱ آمده است. براساس نتایج خاک‌های منطقه در چهار گروه بافتی شامل لومرسی، لومشنی، لومرسشنی و شنلومی قرار داشته و مقادیر تقریباً مشابهی آهک (۱۰/۹۲ - ۹/۷۱) داشتند. مقدار ماده آلی خاک‌ها عموماً پایین بود. بررسی میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها به روش الک تر در نمونه‌های خاکدانه با قطر ۶ تا ۸ میلی-متر در خاک‌های بررسی‌شده نیز نشان داد که خاکدانه‌های بررسی‌شده عموماً پایداری اندکی در مقابل آب داشتند و از این رو مقاومت کمتری در برابر عوامل فرساینده از جمله باران داشت. بیشترین پایداری خاکدانه در آب در بافت شنلومی (۱/۴۰) بود. به دلیل اینکه این گروه شامل دو خاک بوده است که به ترتیب مقدار ماده آلی ۱/۱۰ و ۰/۱۱

جدول ۱. میانگین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها

بافت خاک	شن (درصد)	سیلت (درصد)	رس (درصد)	میانگین وزنی قطر خاکدانه (میلی‌متر)	واکنش	هدایت الکتریکی (دسی زیمنس بر متر)	ماده آلی کربنات کلسیم (درصد)	معادل (درصد)
لوم رسی	۳۸/۳۹	۲۹/۴۲	۳۲/۶۸	۱/۱۲	۷/۳۳	۰/۵۸	۰/۸۸	۱۰/۹۲
لوم شنی	۷۱/۹۸	۱۴/۶۵	۱۷/۸۸	۱/۲۰	۷/۴۱	۰/۵۶	۰/۴۶	۹/۸۶
لوم رس شنی	۵۳/۲۳	۲۱/۲۴	۲۶/۲۰	۱/۲۴	۷/۳۴	۰/۵۷	۰/۶۷	۹/۴۰
شن لومی	۸۴/۵۳	۱۱/۲۱	۴/۸۳	۱/۴۰	۷/۴۱	۰/۶۷	۰/۵۹	۹/۷۱

جدول ۲. تجزیه واریانس خاک‌هایی با بافت مختلف بر فرآیندهای تخریب، تراکم و پاشمان ذرات خاک

منبع تغییر	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F	سطح معنی داری
تخریب خاک	۲۸۰۲/۲۸۱	۳	۹۳۴/۰۹۴	۱۴۳۰/۲۵۸	۰/۰۰۰۱
تراکم خاک	۰/۴۷۵	۳	۰/۱۵۸	۱۳/۸۵۷	۰/۰۰۰۱
پاشمان ذرات	۵۹۹/۰۶۳	۳	۱۹۹/۶۸۸	۶/۵۹۱	۰/۰۰۰۲



شکل ۲. فرایندهای تخریب خاکدانه (الف)، تراکم خاک (ب) و پاشمان ذرات (ج) در خاک‌های با بافت مختلف

درصد رس، پایداری خاکدانه افزایش یافت. همچنین Ternan *et al.* (1996) از رس به‌عنوان یک ملات بین ذرات خاک نام بردند و دریافتند که با افزایش مقدار رس، پایداری ساختمان خاک افزایش می‌یابد. در پژوهشی Oades (1988) نشان داد خاک‌هایی که مقدار رس زیاد دارند، با گذشت زمان پایداری ساختمان آن‌ها کم نمی‌شود. برخلاف نتایج این پژوهش، Mbagwu و Bazzoffi (1998) نشان دادند که تخریب خاک توسط ضربه قطره آب و میزان شن و ماسه همبستگی منفی وجود دارد.

براساس نتایج بیشترین تراکم در خاک‌های با بافت لومرسی با درصد رس (۳۲/۶۸) رخ داد. هرچند ذرات رس در افزایش پایداری خاکدانه‌ها مؤثرند لیکن پس از جداسدن بر اثر ضربه قطرات باران، به‌آسانی در درون منافذ خاک نفوذ می‌کنند. در واقع رس‌های جدا شده به‌دلیل ریزبودن در منافذ خاک و خاکدانه قرار می‌گیرند و سبب کاهش تخلخل و در نتیجه افزایش تراکم خاک می‌شوند. یافته‌های Gupta و Allmaras (1987) نیز نشان داد که هر چه میزان رس در خاک بیشتر باشد به همان نسبت تراکم خاک افزایش می‌یابد.

براساس نتایج بیشترین پاشمان ذرات در خاک‌های با بافت لومرسی و کمترین آن در خاک‌های با بافت شن‌لومی بود (شکل ۳ج). در واقع با افزایش درصد رس و سیلت، میزان پاشمان به‌دلیل کوچک‌بودن این ذرات و امکان پراکنش آسان آن‌ها افزایش یافت. در بافت شن‌لومی و نیز لوم‌شنی به‌دلیل حضور ذرات درشت‌تر پاشمان کمتر بود. در پژوهشی Canga (1999) بیان کرد بر اثر برخورد قطرات باران، ذرات خاک از هم جدا می‌شوند و در ادامه به‌دلیل خیس‌شدن ذرات و کاهش چسبندگی آن‌ها، انتقال ذرات به‌وسیله قطرات برگشت یافته از سطح تسهیل شده و به دنبال آن پاشمان افزایش می‌یابد. در پژوهشی Fan و Li (1993) بیان کردند که شن ریز قابلیت جداسدگی بالاتری را نسبت به شن درشت دارد و ذرات رس به‌دلیل چسبندگی قابلیت جداسدگی پایینی دارند. با افزایش درصد شن، امکان جابه‌جایی ذرات درشت کمتر بوده و پاشمان کاهش می‌یابد (Seybold and Herrick, 2001). یافته‌های Curtin *et al.* (1994) نشان داد که مقدار کل رس عامل تعیین‌کننده‌ای در پراکنش رس و پایداری خاکدانه‌ها است. در پژوهشی Van Dijk *et al.* (2002) به این نتیجه رسیدند که خاک‌های مختلف به یک میزان پاشمان ندارند. خاک‌های لوم‌رسیلته و لومرسی بیشترین مقاومت و استحکام را در برابر تخریب قطرات باران دارند. در حالی که خاکدانه‌های موجود در خاک‌هایی با بافت لوم‌سیلته و شنی کمترین پاشمان را دارند.

شکل ۳ فرایندهای فرسایش بارانی را در خاک‌های مختلف نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که بیشترین تخریب خاکدانه‌ها در بافت شن‌لومی (۸۱/۳۳ درصد) و کمترین آن در بافت لومرسی (۴۹/۹۶ درصد) رخ داد. بیشترین تراکم خاک در بافت لومرسی (۰/۶۸) و کمترین آن در بافت شن‌لومی (۰/۵۴) بود. همچنین نتایج نشان داد که بیشترین پاشمان ذرات در بافت لومرسی (۲۵۵/۶۰) گرم بر سانتی‌متر مربع و کمترین آن در بافت شن‌لومی بود (۹۱/۸۰ گرم بر سانتی‌متر مربع).

نتایج بررسی میزان و چگونگی تأثیر ذرات خاک بر فرایندهای فرسایش بارانی نشان داد که میزان تخریب خاکدانه‌ها بر خلاف ذرات سیلت و رس به‌شدت تحت تأثیر ذرات شن ($r = 0.71, P < 0.01$)، افزایش یافت. با این وجود، میزان تراکم خاک تحت تأثیر ذرات سیلت ($r = 0.25, P < 0.05$) و رس ($r = 0.46, P < 0.01$) افزایش یافت. میزان پاشمان ذرات خاک نیز مانند تراکم خاک با افزایش درصد ذرات شن ($r = -0.46, P < 0.01$)، کاهش و با افزایش درصد ذرات سیلت و رس هر دو ($r = 0.43, P < 0.01$) افزایش یافت (جدول ۳).

جدول ۳. همبستگی بین فرایندهای تخریب خاکدانه، تراکم خاک و پاشمان

ذرات خاک			
متغیر	شن	سیلت	رس
تخریب خاکدانه	۰/۷۱**	-۰/۶۳**	-۰/۷۰**
تراکم خاک	-۰/۳۸**	۰/۲۵*	۰/۴۶**
پاشمان ذرات	-۰/۴۶**	۰/۴۳**	۰/۴۳**

* معنی‌داری در سطح ۰/۰۵ درصد ** معنی‌داری در سطح ۰/۰۱ درصد

دلیل بالابودن تخریب خاکدانه در خاک‌های با بافت شن‌لومی (شکل ۳ الف)، پایین‌بودن درصد رس (۴/۸۳) در این نوع خاک‌ها بود. در خاک‌های با بافت لومرسی، به‌دلیل حضور بیشتر ذرات رسی، چسبندگی بین ذرات خاک و در نتیجه مقاومت خاکدانه‌ها افزایش یافت. از این رو تخریب خاکدانه‌ها تحت تأثیر قطرات باران در خاک‌های با بافت لومرسی کمترین بود. در خاک‌های با بافت شن‌لومی، درصد ذرات شن بالا بود و به همین دلیل تخریب آن‌ها بیشتر شد. در پژوهشی Deneff *et al.* (2001) نشان دادند که نسبت خاکدانه‌های پایدار در آب و همچنین تعداد کل آن‌ها ممکن است تابعی از نوع خاک و نوع کانی‌های رسی باشد. در مطالعه‌های Skidmore and Layton (1992) نشان دادند که پایداری خاکدانه‌های خشک را می‌توان از مقدار رس برآورد کرد. در پژوهشی Bossuyt *et al.* (2001) دریافتند که رس به‌عنوان عامل مهمی در پیوند دادن ذرات اولیه خاک به هم‌دیگر و تشکیل خاکدانه‌ها عمل کرد و با افزایش

نتیجه‌گیری

تخریب خاکدانه با افزایش درصد ذرات سیلت و رس کاهش یافت. با این وجود، تراکم خاک و پاشمان ذرات به‌شدت تحت‌تأثیر درصد ذرات سیلت و رس افزایش یافت. چسبندگی بالای ذرات رس نقشی مؤثر در افزایش مقاومت خاکدانه‌ها در برابر تخریب داشت. چگونگی تأثیر ذرات شن در وقوع فرایندهای فرسایش بارانی برخلاف ذرات سیلت و رس بود. اندازه بزرگ‌تر ذرات شن امکان پاشمان آن‌ها را به حداقل رساند.

نتایج نشان داد که فرایندهای فرسایش بارانی (تخریب، تراکم و پاشمان) به‌شدت تحت‌تأثیر بافت خاک قرار دارند. بیشترین میزان تخریب در خاک‌هایی با بافت شن‌لومی و بیشترین تراکم خاک و پاشمان ذرات در خاک‌هایی با بافت لوم‌رسی مشاهده شد. تأثیر نوع بافت خاک بر وقوع فرایند تخریب خاکدانه بیشتر از فرایندهای تراکم خاک و پاشمان ذرات بود. براساس نتایج

REFERENCES

- AL-Durrah M. M. and Bradford J. M. (1982). Parameters for describing soil detachment due to single water drop impact. *Soil Science Society of America Journal*, 46(4), 836-840.
- Angulo-Martínez, M., Beguería, S., Navas, A. and Machín, J. (2012). Splash erosion under natural rainfall on three soil types in NE Spain. *Geomorphology*, Partic In Press, No. 4038, Pages7.
- Barthes, B. G., Kouoa Kouoa, E., Larre-Larrouy. M. C., Razafimbelo, T. M., de Luca, E. F., Azontonde, A., Neves, C. S., de Freitas, P. L. and Feller, C. L. (2008). Texture and sesquioxide effects on water stable aggregates and organic matter in some tropical soils. *Geoderma*, 143, 14-25.
- Barthes, B. and Roose, E. (2002). Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion; validation at several levels. *Catena*, 47, 133-149.
- Bisal, F. 1960. The effect of raindrop size and impact velocity on sand splash. *Canadian Journal of Soil Science*, 40, 242-245.
- Bossuyt, H., Deneff, K., Six, J., Frey, S. D., Merckx, R. and Paustian, K. (2001). Influence of microbial populations and residue quality on aggregate stability. *Applied Soil Ecology*, 16, 195-208.
- Canga, M. R. (1999). Effects of subsequent simulated rainfall on runoff and erosion. *Agriculture and Forester*, 23, 659-665.
- Curtin, D. C. A., Campbell, R. P. and Lafond. G. P. (1994). Long-term management and clay dispersibility in two haploborolls in Saskatchewan. *Soil Science Society of America Journal*, 58, 962-967.
- Deneff, K., Six, J., Paustian, K. and Merckx, R. (2001). Importance of macroaggregate dynamics in controlling soil carbon stabilization: short-term effects of physical disturbance induced by dry-wet cycles. *Soil Biology Biochemistry*, 33, 2145-2153.
- Fan, R. and Li, Z. (1993). Rainsplash and sediment transport model on the slope. *Journal of Hydraulic Engineering*, 6, 24-29.
- Fattet, M., Ghestem, M., Ma, W., Foulonneau, M., Nespoulous, J., Le Bissonnais, Y. and Stokes, A. (2011). Effects of vegetation type on soil resistance to erosion: Relationship between aggregate stability and shear strength. *Catena*, 87, 60-69.
- Fernandez-Raga, M., Fraile, R., Keizer, J., Eufemia, M. and Castro, A. (2010). The kinetic energy of rain measured with an optical disdrometer: An application to splash erosion in Leon (Spain). *Atmospheric Research*, 96, 619-635.
- Gee, G. W. and Boudet, J. W. (1986). Particle size analysis. In: methods of soil analysis. Part I. Klute, I. (Ed). Agron. Monoger.9. I.S.I. Madison. W.I. pp. 411-383.
- Gupta, S. C. and Allmaras, R. R. (1987). Models to assess the susceptibility of soils to excessive compaction. *Soil Science Society of America Journal*, 6, 100-65.
- Kinnell, P. I. A. (2005). Raindrop-impact-induced erosion processes and prediction: A review. *Hydrological Processes*, 19, 2815-2844.
- Legout, C., Legue'dois, S., Le Bissonnais, Y. and Malam Issac, O. (2005). Splash distance and size distributions for various soils. *Geoderma*, 124, 279-292.
- Mbagwu, J. and Bazzoffi, P. (1998). Soil characteristics related to resistance of breakdown of dry soil aggregates by water-drops. *Soil and Tillage Research*, 45, 133-145.
- Neave, M. and Rayburg, S. (2007). A field investigation into the effects of progressive rainfall induced soil seal and crust development on runoff and erosion rates: The impact of surface cover. *Geomorphology*, 87, 378-390.
- Oades, J. M. (1988). The retention of organic matter in soils. *Biogeochem*, 5, 35-70.
- Page, M. C., Sparks, D. L. and Noll, M. R. (1987). Kinetics and mechanisms of potassium release from sandy middle Atlantic coastal. Plain soils. *Soil Science Society of America Journal*, 51, 1465-1460.
- Ramos, M. C., Nacci, S. and Pla, I. (2003). Effect of raindrop impact and its relationship with aggregate stability to different disaggregation forces. *Catena*, 53, 365-376.
- Ruiz-Sinoga, J. D. and Romero Diaz, A. (2010). Soil degradation factors along a Mediterranean pluviometric gradient in Southern Spain. *Geomorphology*, 118, 359-368.

- Saint-Jean, S., Chelle, M. and Huber, L. (2004). Modelling water transfer by rain-splash in a 3D canopy using Monte Carlo integration. *Agricultural and Forest Meteorology*, 121, 183–196.
- Seybold, C. A. and Herrick J. (2001). Aggregate stability kit for soil quality assessment. *Catena*, 44, 37-45.
- Skidmore, E. L. and Layton, J. B. (1992). Dry-soil aggregate stability as influenced by selected soil properties. *Soil Science Society of America Journal*, 75, 557-561.
- Ternan, J. L., Williams, A. G., Elmes, A. and Hartley, R. (1996). Aggregate stability of soils in central Spain and the role of land management. *Earth Surface Processes and Landforms*, 21, 181-193.
- Valettea, G., Prevosta, S. and Lucasa, L. (2006). A simulation of soil surface degradation by rainfall. *Computers and Graphics*, 30, 494–506.
- Van Dijk, A. I., Meesters, A. G. 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.
- 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, 38-29.
- Yoder, R. E. (1936). A direct method of aggregate analysis and a study of a physical nature of erosion losses. *Journal of America Agronomy*, 28, 351-337.
- Zanjan Water Organization. (2011). Study reports of Zanjan plain. Zanjan Water Organization Press, pp. 27-54.