

تغییرات رواناب در ابعاد کرت در نمونه‌های خاک با بافت مختلف تحت رخدادهای یکسان باران شبیه‌سازی شده

حیدر حسن زاده^۱، علی‌رضا واعظی^{۲*}، محمدحسین محمدی^۳

۱. دانشجوی سابق کارشناسی ارشد گروه خاک‌شناسی دانشکده کشاورزی دانشگاه زنجان

۲، ۳. استادیاران، گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی دانشگاه زنجان

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۴/۲۴ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۲/۷/۸)

چکیده

تولید رواناب، در کنار تأثیرپذیری از ویژگی‌های باران و ویژگی‌های سطح خاک، از نوع خاک نیز تأثیر می‌پذیرد. این پژوهش با هدف بررسی تغییرات رواناب طی رخدادهای ثابت باران در خاک‌های با بافت مختلف در استان زنجان انجام گرفت. بدین منظور، پس از بررسی‌های اولیه، ۱۰ نوع خاک با بافت مختلف شناسایی و از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متر نمونه‌برداری شد. آزمایش در قالب طرح بلوک‌های کاملاً تصادفی سه بار تکرار شد. خاک‌ها به کرت‌هایی با ابعاد ۸۰×۶۰ سانتی‌متر و عمق ۲۰ سانتی‌متر در زمینی با شیب ۸ درصد انتقال یافت. کرت‌ها در معرض ۱۰ رخداد باران شبیه‌سازی شده با شدت ثابت ۵۵ میلی‌متر بر ساعت و مدت ۳۰ دقیقه با فاصله زمانی پنج روز قرار گرفتند. رطوبت خاک پیش از آغاز هر رخداد به روش وزنی اندازه‌گیری شد. زمان آغاز رواناب و حجم آن در هر کرت در هر رخداد باران اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد رطوبت خاک، زمان آغاز رواناب، و مقدار رواناب تحت تأثیر بافت خاک قرار می‌گیرد ($P < 0.001$). رخدادهای بارندگی نیز اثری معنادار بر رطوبت خاک، زمان آغاز رواناب، و عمق رواناب داشتند ($P < 0.001$). از رخداد اول تا رخداد چهارم رطوبت خاک و تولید رواناب افزایش و زمان آغاز رواناب به‌طور معنادار کاهش یافت. از رخداد پنجم به بعد، احتمالاً به دلیل به‌پایان رسیدن نسبی تخریب ساختمان خاک، تفاوت چشمگیری در مشخصه‌های رواناب دیده نشد. بر اساس نتایج، بین زمان آغاز رواناب و نیز عمق رواناب و رطوبت خاک رابطه‌ای معنادار (به‌ترتیب $R^2 = 0.96$, $P < 0.001$ و $R^2 = 0.94$, $P < 0.001$) وجود دارد.

کلیدواژگان: حجم رواناب، رطوبت خاک، زمان آغاز رواناب، ساختمان خاک، شبیه‌ساز باران.

مقدمه

فرسایش خاک به‌وسیله آب فرایندهای مختلفی به‌دنبال دارد؛ از جمله جدا شدن ذرات از بستر اولیه و انتقال آن‌ها. شدت وقوع این فرایندها، علاوه بر ویژگی‌های خاک و پوشش آن، تابعی از نیروهای فرساینده (قطرات باران و رواناب) و برهمکنش بین آن‌هاست (Rohipour and Asadi, 2009). رواناب، به‌مثابه بخشی از نزولات آسمانی رسیده به سطح خاک، هنگامی رخ می‌دهد که شدت بارندگی بیشتر از سرعت نفوذ آب به خاک باشد (Gupta, 2002). مقدار رواناب تحت تأثیر ویژگی خاک (بافت، ساختمان، نفوذپذیری، رطوبت اولیه)، ویژگی باران (شدت و مدت)، شیب، و ویژگی سطح است (Blanco and Lal, 2008). از میان ویژگی‌های مختلف خاک، بافت خاک عاملی بسیار مؤثر بر تولید رواناب است (Robio et al., 1997). با وجود آنکه خاک‌های شنی نسبت به خاک‌های رسی تخلخل کمتری دارند، عمده تخلخل آن‌ها شامل منافذ درشت است (Blanco

and Lal, 2008). ساختمان مناسب خاک در افزایش سرعت نفوذ آب به خاک مؤثر است؛ لیکن گزارش‌ها نشان می‌دهد سرعت نفوذ آب به خاک با درصد ذرات درشت رابطه‌ای مثبت و با درصد ذرات ریز رابطه‌ای منفی دارد (Wuest et al., 2006). خاک‌های شنی، با وجود داشتن تخلخل کل کمتر نسبت به خاک‌های رسی، منافذ درشت بیشتری دارند (Blanco and Lal, 2008). از این رو، تحت بارانی با شدت معین خاک‌های شنی رواناب کمتری نسبت به خاک‌های رسی تولید می‌کنند (Santos et al., 2003).

تولید رواناب در کنار تغییرات مکانی به تأثیر تغییرات زمانی نیز دچار می‌شود (Merz et al., 2006; Vaezi et al., 2008). تغییرات زمانی رواناب تابع تغییرات محیطی، مانند پوشش گیاهی و رطوبت خاک و باران، است (Dunjo et al., 2004). گاهی تغییرات رواناب به صورت فصلی است؛ به‌طوری که طی فصل زمستان به‌دلیل کاهش نفوذپذیری خاک (Sadeghi et al., 2010; Bakhshi Tiregani et al., 2010; Mohammadi and Kaviani, 2010) و کاهش پوشش گیاهی (Dunjo et al., 2004)

* نویسنده مسئول : vaezi.alireza@gmail.com

استقرار خاک‌ها در زمین

خاک‌های جمع‌آوری شده به زمینی بکر با مساحت ۳۰۰ متر مربع و شیب کلی ۸ درصد واقع در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه زنجان با مختصات جغرافیایی "۴۴' ۲۵' ۴۸° طول شرقی و "۵۲' ۰۱' ۳۶° عرض شمالی منتقل شد. شیب زمین رو به شمال و خاک آن لوم بود. ابتدا ناهمواری‌های زمین با دستگاه تسطیح حذف و شیب آن یکنواخت شد. آزمایش در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در ۱۰ نوع (تیمار) بافت خاک و ۳ تکرار طرح‌ریزی شد. بدین صورت که تیمارها در جهت عمود بر شیب زمین (در عرض زمین) و تکرارها در جهت شیب زمین قرار داده شد (شکل ۲ الف). پیش از انتقال خاک‌ها به زمین، کرت‌های فرسایشی به‌عنوان واحدهای آزمایشی ایجاد شدند. برای این منظور از صفحات فلزی مستطیل‌شکل (گالوانیزه) با ضخامت ۰/۶ میلی‌متر با ابعاد ۸۰×۶۰ سانتی‌متر و عمق ۲۰ سانتی‌متر استفاده شد. ضلع پایینی آن‌ها به شکل دوزنقه و شیب‌دار، جهت هدایت رواناب و رسوب به سمت سوراخی که در انتهای آن‌ها تعبیه شده بود، طراحی شد. در انتهای هر کرت لوله‌ای برای انتقال و ظرفی با حجم ۱۰ لیتر برای جمع‌آوری رواناب و رسوب قرار داده شد (شکل ۲ ب). پس از استقرار کامل کرت‌ها و تثبیت آن‌ها در زمین، نمونه‌های خاک تا ارتفاع ۱۳ سانتی‌متر داخل فلوم‌ها ریخته شد. فاصله جانبی کرت‌ها از هم ۱۲۰ سانتی‌متر و فاصله طولی (در جهت شیب) آن‌ها از هم ۲۵۰ سانتی‌متر بود.

اعمال رخدادهای باران شبیه‌سازی شده

برای اعمال رخدادهای باران ابتدا یک باران‌ساز مصنوعی طراحی و ساخته شد. دستگاه شبیه‌ساز باران دارای ابعاد ۹۲ × ۷۲ سانتی‌متر، ارتفاع ۲۱۵ سانتی‌متر، و دامنه شدت ۱۲۰-۵۵ میلی‌متر بر ساعت بود (شکل ۳). ابعاد صفحه ریزش باران ۸۰ × ۶۰ سانتی‌متر و هم‌سطح با کرت‌های از قبل ساخته شده بود. تعداد ۱۰ رخداد باران از اول شهریور تا آخر مهر ۱۳۹۰ به فاصله پنج روز از هم روی کرت‌های فرسایشی اعمال شد. انتخاب این دوره زمانی به دلیل احتمال پایین وقوع باران‌های طبیعی بود. هر رخداد باران با شدت یکنواخت ۵۵ میلی‌متر بر ساعت و میانگین قطر قطرات ۳/۲۷ میلی‌متر به مدت ۳۰ دقیقه بر کرت‌ها اعمال شد. بدین ترتیب مجموعاً ۳۰۰ رخداد بارندگی بر ۳۰ کرت فرسایشی اعمال شد. تجزیه و تحلیل شدت‌های بارندگی در منطقه مورد بررسی بر اساس آمار ۱۰ ساله (سال ۱۳۸۰-۱۳۹۰) ایستگاه قلتوق در غرب استان نشان داد شدت بارندگی در منطقه در محدوده ۵ تا ۱۰۰ میلی‌متر بر ساعت با تداوم ۳ تا ۶۰ دقیقه قرار دارد. انتخاب شدت‌های کمتر از ۵۵ میلی‌متر بر ساعت موجب بروز غیر یکنواختی توزیع باران در سطح صفحه بارش دستگاه باران‌ساز می‌شد. برای حذف تأثیر باد بر سقوط آزاد قطرات، از پوشش پلاستیکی پیرامون دستگاه استفاده شد. رطوبت خاک‌ها در لایه ۱۰-۰ سانتی‌متری از سطح خاک به روش وزنی اندازه‌گیری شد (Foltz et al., 2009). رطوبت خاک در هر کرت در فاصله زمانی ۵ روز (مطابق فاصله بین رخدادهای دقیقاً پیش از اعمال هر رخداد بارندگی تعیین شد.



شکل ۲ ب. مخزن رواناب و رسوب



شکل ۲ الف. کرت‌های فرسایشی



شکل ۳. نمایی از دستگاه شبیه‌ساز باران طراحی شده و مستقر بر کرت فرسایشی

اندازه‌گیری رواناب در رخدادهای باران

برای اندازه‌گیری زمان آغاز رواناب از لحظه شروع بارندگی از زمان‌سنج دستی استفاده شد (Engel et al., 2009). برای تعیین حجم رواناب تولیدشده در هر کرت، ابتدا حجم مخلوط رواناب و رسوب داخل ظرف پایین دست هر کرت در صحرا اندازه‌گیری شد. سپس محتویات ظرف مذکور به‌طور دستی کاملاً بهم زده شد و نمونه‌ای همگن از مخلوط رواناب و رسوب با حجم حدود نیم لیتر به آزمایشگاه منتقل و وزن و حجم آن تعیین شد (Girmay et al., 2009). با تعیین حجم رواناب هر نمونه، حجم کل رواناب هر کرت به‌دست آمد. عمق رواناب در هر رخداد از تقسیم حجم رواناب بر مساحت کرت آزمایشی به‌دست آمد.

اندازه‌گیری ویژگی خاک

برای تعیین ویژگی خاک، نمونه‌ها از هر کرت تهیه و پس از هواخشک‌شدن از الک دو میلی‌متری عبور داده شد. در نمونه‌های خاک درصد سنگ‌ریزه^۱ (قطر ۲ تا ۸ میلی‌متر) به روش وزنی (Gee and Bauder, 1986)، چگالی حقیقی (Pd) به روش پیکنومتر (Klute, 1986)، چگالی ظاهری خاک (Bd) با استفاده از سیلندر فلزی به قطر ۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۴٫۹ سانتی‌متر در صحرا (Blake and Hartge, 1986)، رطوبت اشباع (SP) به روش وزنی (Carter and Gregorich, 2008)، هدایت هیدرولیکی اشباع (K_s) در نمونه‌های دست‌خورده با قطر ۲ میلی‌متر به روش بار ثابت (Page, 1986)، ماده آلی (OM) به روش والکی و بلاک (Walkly and Black, 1934)، کربنات

1. Gravel

کلسیم معادل (CaCO_{3,eqv}) به روش تیتراسیون با سود NaOH (Page et al., 1986)، مقدار گچ (CaSO_{4,2H₂O}) در خاک به روش استون (Page, 1982)، درصد سدیم تبدلی (ESP) به روش استات آمونیوم (Klute, 1986)، واکنش خاک (pH) در گل اشباع به‌وسیله pH متر، هدایت الکتریکی (EC) به‌وسیله EC متر در عصاره اشباع، ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) به روش باور (Klute, 1986)، و درصد رطوبت خاک (θ) به روش وزنی (Foltz et al., 2009) اندازه‌گیری شد.

تجزیه و تحلیل داده‌ها

پیش از تحلیل داده‌ها، آزمون نرمال بودن توزیع آماری داده‌ها به روش تعیین چولگی و کشیدگی داده‌ها و رسم هیستوگرام بررسی شد. برای بررسی تفاوت تیمارهای ۱۰ نوع بافت خاک از نظر رطوبت خاک و زمان آغاز رواناب و میزان تولید رواناب از آزمون دانکن استفاده شد. جهت تجزیه و تحلیل داده‌ها از نرم‌افزار SPSS نسخه ۱۶ استفاده شد. برای پیدا کردن نوع رابطه میزان رواناب و رخدادهای متناوب باران از نرم‌افزار Excel نسخه ۲۰۱۰ استفاده شد.

یافته‌ها و بحث

نتایج آزمایش‌های فیزیکی و شیمیایی در جدول ۱ می‌آید. خاک‌ها از نظر ماده آلی فقیر (۰٫۲ تا ۱ درصد)، در برخی موارد دارای گچ (مانند بافت رسی، لوم رس شنی، رس سیلتی)، و عمدتاً در گروه خاک‌های آهکی (۱۳٫۱ تا ۲۴٫۷) بودند. بررسی اسیدیته و هدایت الکتریکی خاک‌ها درجه شوری پایین و اسیدیته‌بودن را در محدوده خنثی تا قلیایی نشان داد. ظرفیت

نتایج نشان داد خاک لومی کمترین زمان آغاز رواناب را دارد (شکل ۵). در خاک‌های شنی و شن لومی زمان آغاز رواناب به تأخیر افتاد. پایین بودن هدایت هیدرولیکی خاک لومی (جدول ۱) می‌تواند دلیل اصلی این موضوع باشد. ظهور سریع رواناب در خاک‌های رسی نیز به دلیل پایین بودن سرعت نفوذ آب به خاک نسبت به خاک‌های شنی بود (Santos et al., 2003). ناپایداری ساختمان لایه سطحی خاک نیز یکی از دلایل مهم وقوع رواناب در این خاک‌هاست.

بر اساس نتایج، بالاترین میزان تولید رواناب در خاک لومی است (شکل ۶). البته تفاوتی بین این خاک با خاک لوم رسی و لوم سیلت مشاهده نشد. تولید رواناب در خاک رسی، برخلاف انتظار، کمتر از خاک لومی بود. این موضوع احتمالاً به دلیل تخریب سریع‌تر و بیشتر ساختمان در اثر ضربه قطرات باران در خاک لومی بود. در تحقیقی Mamadov et al. (2001) نشان دادند خاک‌های با ۲۲/۵ تا ۴۰/۲ درصد رس (لوم و رس شنی) در مقایسه با خاک‌های با بیش از ۴۰ درصد رس رواناب بیشتری تولید می‌کنند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که اگرچه مقدار رس در این خاک‌ها برای ایجاد انسداد کافی است، برای تثبیت خاک‌دانه‌ها در برابر تخریب به وسیله قطرات باران کافی نیست.

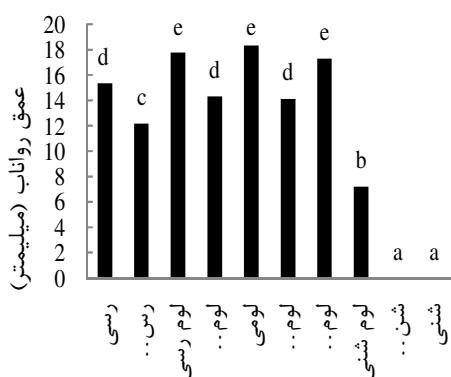
تبادل کاتیونی در دامنه ۱۱ تا ۳۸ سانتی‌مول‌بار در کیلوگرم خاک قرار داشت.

طی دوره تحقیق بارندگی طبیعی رخ نداد و رطوبت خاک فقط تحت تأثیر باران شبیه‌سازی شده و شرایط جوی تأمین شد. بر اساس نتایج (جدول ۲)، رطوبت خاک و زمان آغاز رواناب و عمق رواناب تحت تأثیر معنادار بافت خاک قرار گرفت ($P < 0.001$). در واقع بافت خاک از ویژگی‌های مهم خاک از نظر تأثیر بر تولید رواناب بود.

مقایسه میانگین اثر بافت خاک بر میانگین رطوبت خاک و زمان آغاز رواناب و عمق رواناب در شکل‌های ۴ و ۵ و ۶ می‌آید. میانگین رطوبت خاک در مجموع ۱۰ رخدادهای بارندگی (شکل ۴) در خاک رسی و رس سیلنتی بالاترین مقدار و در خاک شنی و شن لومی کمترین مقدار بود. این موضوع ناشی از تأثیر چشمگیر ذرات رس در نگهداری آب در خاک‌ها بود (Hawke et al., 2006). درصد رطوبت خاک‌های لوم سیلنتی و لوم رس شنی، با وجود داشتن درصد رس پایین‌تر نسبت به خاک‌های لوم و لوم رس سیلنتی و لوم رسی، بالاتر بود. حضور مقدار بالاتر ماده آلی در این خاک‌ها دلیل اصلی بالاتر بودن رطوبت اولیه در آن‌ها بود (Rodriguez et al., 2006; Hudson, 1994).

جدول ۱. ویژگی فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مطالعه شده

ویژگی	بافت خاک	رسی	لوم رسی	رس	لومی	لوم رس سیلنتی	لوم رسی شنی	لوم سیلنتی	لوم شنی	شن لومی	شنی
Sand (%)	۱۰/۶	۳۳/۲	۱۵/۳	۳۸/۱	۱۳/۷	۴۸/۸	۱۳/۰	۶۶/۷	۸۰/۱	۸۷/۰	
Silt (%)	۲۲/۲	۲۸/۶	۴۲/۶	۳۵/۶	۵۱/۵	۲۴/۹	۶۱/۳	۱۴/۸	۶/۹	۳/۷	
Clay (%)	۶۷/۱	۳۸/۱	۴۲/۰	۲۶/۳	۳۴/۸	۲۶/۲	۲۵/۷	۱۸/۴	۱۳/۰	۹/۳	
Gravel (%)	۰/۷	۸/۲	۰/۶	۵/۱	۰/۵	۸/۹	۳/۰	۲۷/۵	۳۱/۱	۳۰/۸	
Pd (Mg/m ³)	۲/۶	۲/۴	۲/۵	۲/۶	۲/۷	۲/۷	۲/۸	۲/۷	۲/۹	۲/۹	
Bd (Mg/m ³)	۱/۱	۱/۰	۱/۳	۱/۲	۱/۲	۱/۶	۱/۴	۱/۵	۱/۶	۱/۶	
SP (%)	۷۱/۶	۵۸/۱	۶۵/۷	۵۵/۲	۶۵/۳	۵۴/۲	۵۸/۷	۲۸/۲	۲۸/۳	۲۷/۳	
K _s (cm/hr)	۱/۶	۲/۵	۱/۹	۱/۶	۲/۸	۳/۰	۱/۷	۵/۰	۷/۶	۹/۳	
OM (%)	۰/۲	۰/۲	۰/۴	۱/۰	۰/۳	۱/۲	۱/۹	۰/۳	۰/۳	۰/۲	
CaCO _{3,eqv} (%)	۱۵/۷	۱۳/۱	۱۷/۴	۲۴/۷	۲۵/۷	۱۶/۴	۱۴/۷	۱۶/۲	۱۵/۵	۱۴/۰	
CaSO _{4,2H₂O} (%)	۱۲/۶	۰/۱	۱۱/۶	۰/۱	۰/۰	۴/۴	۲/۳	۰/۰	۰/۰	۰/۰	
ESP (%)	۹/۸	۱۰/۸	۶/۸	۱۶/۴	۱۳/۲	۱۵/۹	۹/۳	۷/۱	۴/۳	۵/۵	
Ph	۷/۶	۷/۴	۷/۷	۷/۳	۷/۷	۷/۴	۷/۲	۷/۳	۷/۲	۷/۱	
EC (dS/m)	۲/۴	۱/۹	۱/۸	۰/۷	۱/۲	۲/۰	۱/۴	۱/۳	۱/۷	۱/۳	
CEC (cmolc/kg)	۲۷/۲	۳۸/۰	۳۱/۳	۲۱/۲	۱۸/۲	۲۷/۹	۳۸/۰	۱۳/۳	۱۶/۳	۱۰/۷	

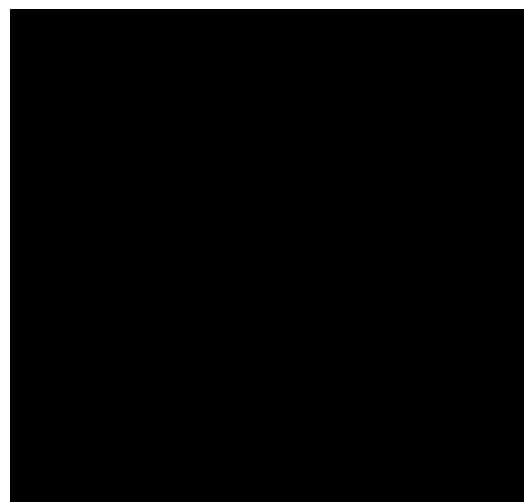


شکل ۶. مقایسه میانگین تغییرات عمق رواناب در خاک‌ها تحت باران یکسان شبیه‌سازی شده

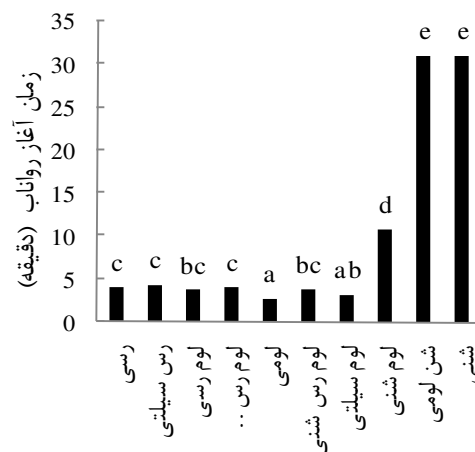
بررسی علت وجود تغییرات مقدار رواناب بین خاک‌های مختلف از طریق ماتریس همبستگی (جدول ۳) نشان داد تولید رواناب همبستگی معنادار با درصد ذرات معدنی (شن و سیلت و رس)، جرم مخصوص ظاهری، رطوبت اولیه، و هدایت هیدرولیکی اشباع خاک‌ها دارد. با افزایش سیلت و رس رطوبت اولیه تولید رواناب در خاک‌ها افزایش یافت. همچنین با افزایش شن، جرم مخصوص ظاهری و هدایت هیدرولیکی اشباع تولید رواناب کاهش یافت. پارامترهای ماده آلی و کربنات کلسیم معادل همبستگی معناداری با تولید رواناب نداشتند. وجود همبستگی منفی بین جرم مخصوص ظاهری با رواناب ناشی از بالابودن این ویژگی در خاک‌های با بافت سبک (شنی و شن لومی) بود. زیرا خاک‌های مذکور، در کنار این موضوع، روانابی نیز تولید نکردند.

جدول ۲. تجزیه واریانس اثر بافت خاک بر رطوبت خاک و زمان آغاز رواناب و عمق رواناب

منبع تغییر	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F	سطح معناداری
رطوبت خاک	۶۹۱٫۲۳	۹	۷۶٫۸۰	۲۵۰٫۳۲	۰٫۰۰۰
زمان آغاز رواناب	۳۴۸۲٫۰۷	۹	۳۸۶٫۸۹	۲٫۴۵	۰٫۰۰۰
عمق رواناب	۱۲۹۶٫۷	۹	۱۴۴٫۰۷	۱۳۰٫۹۱	۰٫۰۰۰



شکل ۴. مقایسه میانگین تغییرات رطوبت در خاک‌ها تحت باران یکسان شبیه‌سازی شده



شکل ۵. مقایسه میانگین تغییرات زمان آغاز رواناب در خاک‌ها تحت باران یکسان شبیه‌سازی شده

جدول ۳. همبستگی بین تولید رواناب و ویژگی خاک

ویژگی	همبستگی
Sand	-۰٫۸۳***
Silt	۰٫۷۴***
Clay	۰٫۶۱***
BD	-۰٫۸۴***
OM	۰٫۲۱ ^{ns}
CaCO _{3,eqv}	۰٫۳۲ ^{ns}
Θi	۰٫۶۰***
Ks	-۰٫۹۴***

*** همبستگی در سطح ۰٫۰۰۱ معنادار و ^{ns} غیر معنادار است.

بر اساس پژوهش حاضر، در هیچ‌یک از رخدادهای باران بر بافت‌های شن و شن لومی رواناب تشکیل نشد. بیشتر بودن نفوذپذیری این دو خاک در این زمینه بسیار حائز اهمیت بود. تولید رواناب در خاک‌های با بافت سبک به دلیل وجود بیشتر ذرات شن کمتر از خاک‌های با بافت ریز بود. در پژوهش *Adekalu et al.* (2007) در خاک‌های مناطق گرمسیری نیجریه روشن شد میانگین رواناب سطحی با میزان شن خاک (۰٫۶۵- r) همبستگی منفی دارد. خاک‌های لوم و لوم سیلت و لوم رسی، با تشکیل سله، باعث کاهش نفوذپذیری و تولید بیشتر رواناب شدند. تولید رواناب در خاک رس سیلتی کمتر از

اول تا رخداد چهارم موجب شد مقدار رطوبت خاک تحت تأثیر قرار گیرد. با وجود این از رخداد پنجم به بعد، به دلیل به پایان رسیدن تخریب نسبی ساختمان خاک، تغییرات مقدار رطوبت خاک ناچیز بود.

زمان آغاز رواناب نیز در رخداد اول دیرتر اتفاق افتاد. این موضوع به دلیل پایین بودن مقدار رطوبت خاک و بالا بودن سرعت نفوذ آب به خاک در ابتدای آزمایش بود. تخریب بیشتر ساختمان خاک در رخدادهای بعدی در کنار افزایش رطوبت خاک دلیلی دیگر بر کاهش زمان آغاز رواناب در خاکها بود. از رخداد چهارم به بعد، به دلیل تثبیت وضعیت ساختمان خاک و عدم تغییرات محسوس رطوبت خاک، اختلاف معناداری در زمان آغاز رواناب بین رخدادهای دیده نشد (شکل ۸ ب).

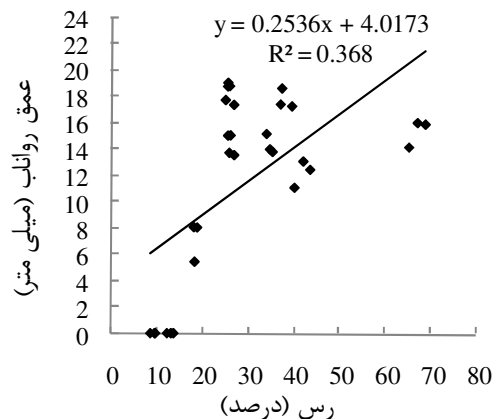
جدول ۴. تجزیه واریانس اثر رخدادهای باران بر رطوبت خاک، زمان آغاز رواناب و عمق رواناب در خاکها

منبع تغییر	مجموع درجه آزادی	میانگین مربعات	F	سطح معناداری
رطوبت خاک	۹	۱۷,۵۲	۵۷,۳۳	۰,۰۰۰
زمان آغاز رواناب	۹	۳۷,۱۷	۱۸,۶۲	۰,۰۰۰
عمق رواناب	۹	۴۳,۵۵	۵۰,۷۵	۰,۰۰۰

عمق رواناب به صورت چشمگیری در رخدادهای بعدی باران افزایش یافت (شکل ۸ ج). این موضوع ناشی از افزایش رطوبت و کاهش نفوذپذیری خاک در طول رخدادهای باران بود. با گذشت زمان از رخداد اول و افزایش رطوبت خاک، چگالی ظاهری خاک نیز در اثر ضربه قطرات باران افزایش یافت. سایر بررسیها نشان داد میزان رطوبت و افزایش آن یکی از عوامل مهم در تراکم خاک است (Arvidson and Keller, 2004). در اثر پاشمان ذرات ریز و نفوذ آنها به داخل منافذ درشت، تخلخل درشت خاک کاهش یافت. حاصل این پدیده کاهش نفوذپذیری، کاهش زمان آغاز رواناب، و در نهایت افزایش مقدار رواناب بود. Wei et al. (2007) در مطالعه‌ای به این نتیجه رسیدند که سله سطحی و انسداد سرعت نفوذ را کاهش می‌دهد و رطوبت خاک اثر معناداری بر رواناب دارد. پژوهش‌ها نشان داد تشکیل لایه اندوده سطحی پس از باران در سطح خاک باعث تغییرات فیزیکی می‌شود؛ تغییراتی نظیر کاهش تخلخل لایه سطحی خاک، کاهش نفوذپذیری، کاهش زبری سطحی خاک، و در نتیجه افزایش سرعت و مقدار رواناب (Asadi et al., 2007). نتایج نشان داد از رخداد اول تا رخداد چهارم عمق رواناب با شیبی زیاد و در ادامه با شیبی غیر محسوس افزایش می‌یابد.

خاک‌های مذکور بود. تشکیل سله در این خاک نیز باعث کاهش نفوذپذیری شد؛ اما تأثیر آن بر افزایش تولید رواناب در خاک‌های لوم و لوم سیلت و لوم رسی بیشتر به نظر می‌رسید. همچنین پایین بودن هدایت هیدرولیکی اشباع در این خاکها دلیل دیگری بر افزایش تولید رواناب در آنها بود (جدول ۱).

نتایج نشان داد با افزایش درصد ذرات سیلت و رس در خاک تولید رواناب نیز افزایش پیدا می‌کند. نیز ذرات رس، به دلیل اندازه ریز نسبت به ذرات سیلت و شن، باعث کاهش نفوذپذیری خاک و در نتیجه افزایش تولید رواناب شدند (Stakland, 2010). شکل ۷ رابطه ذرات رس و رواناب را در خاک‌های بررسی شده نشان می‌دهد.

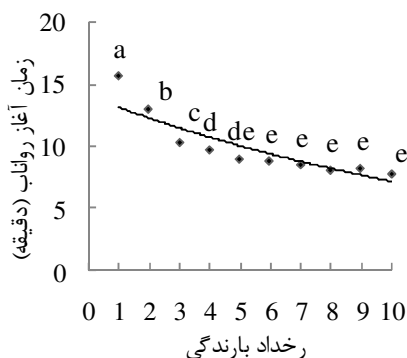


شکل ۷. رابطه درصد رس و عمق رواناب در خاکها تحت باران یکسان شبیه‌سازی شده

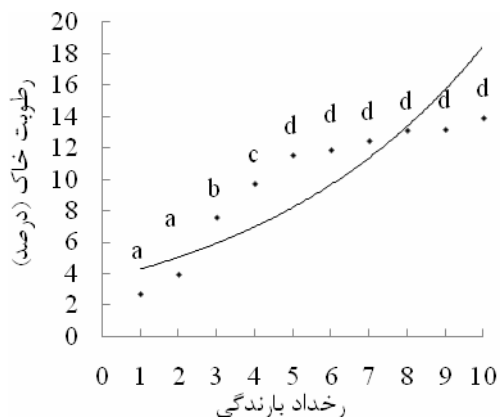
بررسی تغییرات رطوبت خاک، زمان آغاز رواناب، و عمق رواناب در ۱۰ رخداد بارندگی (جدول ۴) نشان داد رخدادهای بارندگی اثری معنادار بر رطوبت خاک در رخدادهای بعدی ($P < 0.001$)، زمان آغاز رواناب ($P < 0.001$)، و عمق رواناب ($P < 0.001$) دارند. با توجه به ثابت بودن ویژگی بارانها، تغییر مشخصه‌های رواناب به دلیل تغییر ویژگی فیزیکی و رطوبت خاک بود. شکل ۸ تغییر رطوبت خاک، زمان آغاز رواناب، و عمق رواناب را در خاک‌های مطالعه شده تحت رخدادهای ثابت باران نشان می‌دهد. رطوبت خاک در رخداد اول به دلیل خشک بودن خاک قبل از اعمال باران پایین تر بود. مقدار رطوبت اولیه خاک به تدریج از رخدادی به رخداد دیگر افزایش یافت؛ طوری که در رخداد دهم بیشترین مقدار را به خود گرفت. با وجود این اختلاف معناداری از رخداد پنجم تا دهم، از نظر میزان رطوبت، در کل خاکها مشاهده نشد (شکل ۸ الف). بدیهی است ساختمان خاک در کنار بافت خاک از عوامل مؤثر بر نگاهداشت آب در خاک و در نتیجه رطوبت خاک است (Boix, 1997; Barthe and Roose, 2002). تخریب ساختمان خاک از رخداد

باران شبیه‌سازی شده نشان داد زمان آغاز رواناب در شرایط مرطوب سه برابر کمتر از این زمان در شرایط خشک است. پژوهش‌های Castillo *et al.* (2003) در سه حوزه آبخیز واقع در جنوب شرق اسپانیا تحت باران شبیه‌سازی شده نشان داد اختلاف تولید رواناب در دو حالت رطوبتی خشک و مرطوب بسیار بالاست و در خاک‌های مرطوب نسبت به خاک‌های خشک زمان کمتری برای آغاز رواناب نیاز است.

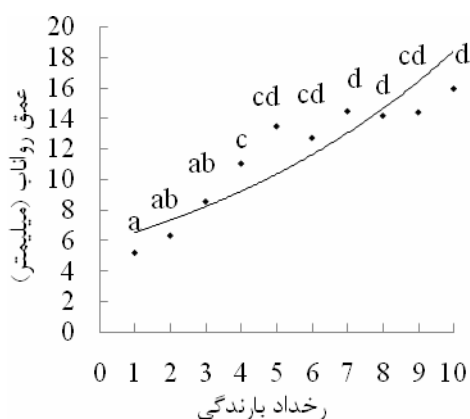
بررسی رابطه زمان آغاز رواناب و رطوبت خاک تحت رخدادهای یکسان باران (شکل ۹ الف) نشان داد با افزایش رطوبت خاک زمان آغاز رواناب به صورت معناداری ($P < 0.001$) کاهش می‌یابد. با افزایش رطوبت خاک، سرعت نفوذ اولیه آب به خاک به شدت تحت تأثیر قرار گرفت و رواناب سریع‌تر ظاهر شد. Raeesiyan (2005) در پژوهشی در پنج مکان مختلف حوزه گرگک، از زیرحوزه‌های کارون شمالی، تحت



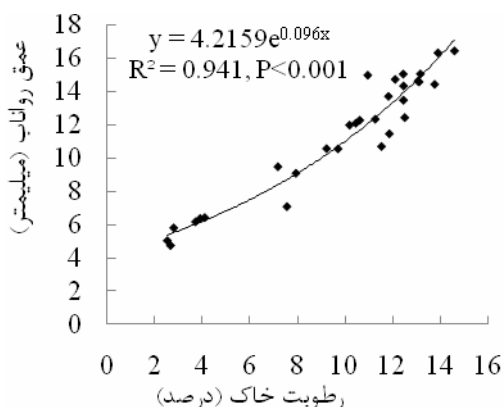
شکل ۸ ب. زمان آغاز رواناب



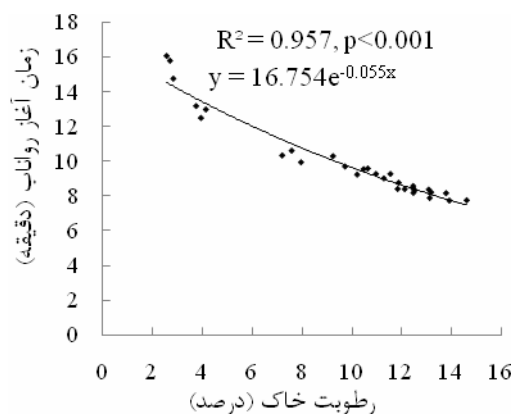
شکل ۸ الف. مقایسه میانگین اثر رخدادهای باران بر رطوبت خاک



شکل ۸ ج. عمق رواناب



شکل ۹ ب. عمق رواناب تحت باران شبیه‌سازی شده



شکل ۹ الف. رابطه رطوبت خاک و زمان آغاز رواناب تحت باران شبیه‌سازی شده

شیب هیدرولیکی را کاهش می‌دهد و باعث کم شدن سرعت نفوذ آب به خاک می‌شود.

نتیجه‌گیری

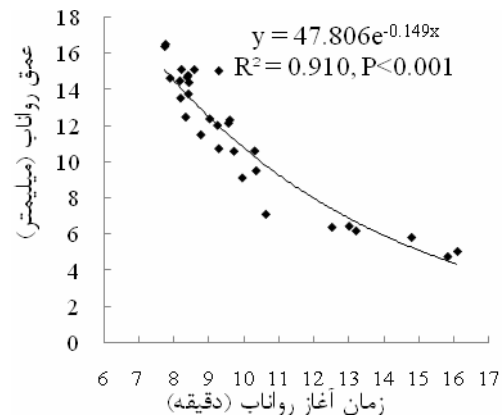
بر اساس نتایج، رطوبت خاک و زمان آغاز رواناب و مقدار رواناب تحت تأثیر معنادار بافت خاک قرار دارند ($P < 0.001$). در خاک لومی، به دلیل تخلخل درشت اندک و در نتیجه هدایت هیدرولیکی پایین، بیشترین میزان رواناب تولید شد. بین رخدادهای بارندگی از نظر رطوبت خاک در رخداد بعدی رواناب ($P < 0.001$)، زمان آغاز رواناب ($P < 0.001$)، و عمق رواناب ($P < 0.001$) تغییرات معنادار وجود داشت. از رخداد اول تا رخداد چهارم رطوبت خاک افزایش یافت. در نتیجه زمان آغاز رواناب کم شد و مقدار تولید رواناب بالا رفت. در رخدادهای بعدی، به دلیل به پایان رسیدن تخریب نسبی ساختمان و عدم تفاوت چشمگیر در مقدار رطوبت خاک، تفاوت معناداری در زمان آغاز و مقدار رواناب در خاک‌ها دیده نشد.

سپاسگزاری

از سازمان تحقیقات کشاورزی استان زنجان به دلیل در اختیار قرار دادن اطلاعات خاک‌شناسی منطقه و از آقای مهندس بهزاد بهمنی به دلیل همکاری در نمونه‌برداری خاک و تهیه نقشه جغرافیایی منطقه سپاسگزاریم.

REFERENCES

- Adekalu, K. O., Olorunfemi, I. A., and Osunbitan, J. A. (2007). Grass mulching effect on infiltration, surface runoff and soil loss of three agricultural soils in Nigeria, *Bioresource Technology*, 98, 912-917.
- Arvidson, J. and Keller, T. (2004). Soil precompression stress I. A survey of Swedish arable soils, *Soil and Tillage Research*, 77, 85-95.
- Asadi, H., Mahammodi, SH., and Heidari, A. (2007). Effect of surface sealing on sheet erosion dynamic, *Proceedings of the 12th Soil Science Congress of Iran*, Karaj, Iran, 1148-1149, (In Farsi).
- Bakhshi- Tiregani, M., Moradi, H. R., and Sadeghi, S. H. R. (2010). Comparison of both runoff and sediment in rangeland and dryland between summer and autumn, *Proceedings of the 6th National Conference of Science and Watershed Engineering and 4th National Conference of Erosion and Sediment*, 28-29 April, Tehran, Iran, 203-210, (In Farsi).
- Barthe`s, 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.
- Blake, G. R. and Hartge, K. H. (1986). *Bulk density*, In: Klute, A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis*, Part 1, 2nd ed. Agronomy Monograph, 9. American Society of Agronomy, Madison, WI, 363-375.
- Blanco, H. and Lal, R. (2008). *Principles of Soil Conservation and Management*, Springer Science, 1-46.
- Boix, C. (1997). The roles of texture and structure in the water retention capacity of burnt Mediterranean soils with varying rainfall, *Catena*, 31, 219-236.
- Carter M. R. and Gregorich E. G. (2008). *Soil sampling and methods of analysis*, 2nd ed. Canadian Society of Soil Science Publisher, ISBN10: 0-8493-3586-8.
- Castillo, V. M., Gomez-Plaza, A., and Martinez-Mena, M. (2003). The role of antecedent soil water content in the runoff response of semiarid catchments: a simulation approach, *Journal of Hydrology*, 248, 114-130.
- Dunjo, G., Pardini, G., and Gispert, M. (2004). The role of land use-land cover on runoff generation and sediment yield at a microplot scale, in a small Mediterranean catchment, *Journal of Arid Environment*, 57, 99-116.
- Engel, F. L., Bertol, I., Ritter, S. R., Paz Gonzalez, A., Paz-Ferreiro, J., and Vidal Vazquez, E. (2009). Soil erosion under simulated rainfall in relation to phenological stages of soybeans and tillage methods in Lages, Santa Catarina, Brazil, *Soil and Tillage Research*, 103, 216-221.



شکل ۱۰. رابطه عمق رواناب و زمان آغاز رواناب تحت باران یکسان شبیه‌سازی شده

نتایج نشان داد رطوبت خاک اثری معنادار ($P < 0.001$)، $R^2 = 0.941$) بر عمق رواناب دارد (شکل ۹ ب). با افزایش رطوبت خاک، ظرفیت نفوذ آب به خاک کاهش یافت و ضمن تسریع وقوع رواناب مقدار آن نیز بیشتر شد. همان‌طور که شکل ۱۰ نشان می‌دهد، با کاهش زمان آغاز رواناب میزان رواناب به صورتی معنادار ($P < 0.001$)، $R^2 = 0.910$) افزایش می‌یابد. نتیجه پژوهش *Kavian et al.* (2010) نشان داد رطوبت خاک بیشترین همبستگی ($R^2 = 0.735$) را با تولید رواناب دارد. *Liu et al.* (2011) در پژوهشی نشان دادند افزایش مقدار رطوبت خاک

- Foltz, R. B., Copeland, N. S., and Elliot, W. J. (2009). Reopening abandoned forest roads in northern Idaho, USA: Quantification of runoff, sediment concentration, infiltration, and interrill erosion parameters, *Journal of Environmental Management*, 90, 2542-2550.
- Gee, G. W. and Bauder, J. W. (1986). *Particle size analysis*, In: Methods of soil analysis. Part1, 2nd ed. Klute, A. (Ed). Agronomy Monograph, 9. American Society Agronomy, Madison, WI.: 383-411.
- Girmay, G., Sing, B. R., Nyssen, j., and Borrosen, T. (2009). Runoff and sediment associated nutrient losses under different land uses in Tigray, Northern Ethiopia, *Journal of Hydrology*, 376, 70-80.
- Gupta, O. P. (2002). Water in relation to soils and plants. *Agrobios, India*, 31-34.
- Hamidi-Nahrani, S., Vaezi, A. R., Mohammadi, M. H., and Saba, J. (2011). Temporal variations of runoff generation and soil loss under rainfall simulator, Proceedings of the 12th Soil Science Congress of Iran, 3-5 September, Tabriz, Iran, 142-145, (In Farsi).
- Hawke, R. M., Price, A. G., and Bryan, R. B. (2006). The effect of initial soil water content and rainfall intensity on near-surface soil hydrologic conductivity: a laboratory investigation, *Catena*, 65, 237-346.
- Hudson, B. D. (1994). Soil organic matter and available water capacity, *Journal of Soil and Water Conservation*, 49, 180-194.
- Jain, M. K., Kothiyari, U. C., and RangaRaju, K. G. (2004). A GIS based distributed rainfall-runoff model. *Journal of Hydrology*, 299, 107-135.
- Kavian, A., Azmodeh, A., Soleimani, K., and Vahabzadeh, Gh. (2010). Effect of soil properties on runoff and soil erosion in forest lands, *Journal of Range and Watershed Management, Iranian Journal of Natural Resources*, 63 (1), 89-104, (In Farsi).
- Klute, A. (ed.) (1986). *Methods of soil analysis*, Part 1. 2nd ed. Agronomy Monograph, 9. American Society of Agronomy and Soil Science Society of American, Madison, WI.
- Lili, M., Bralts, V. F., Yinghua, P., Han, L., and Tingwu, L. (2008). Methods for measuring soil infiltration: State of the Art, *Int. J. Agric & Biol, Eng.* 1 (1), 22-30.
- Liu, H., Lei, T. W., Zhao, J., Yuan, C. P., Fan, Y. T., and Qu, L. Q. (2011). Effects of rainfall intensity and antecedent soil water content on soil infiltrability under rainfall conditions using the runoff-on-out method, *Journal of Hydrology*, 396, 24-32.
- Mamedov, A. I., Levy, G. J., Shainberg, I., and Letey, J. (2001). Wetting rate and soil texture effect on infiltration rate and runoff, *Australian Journal of Soil Research*, 36, 1293-1305.
- Merz, R., Blöschl, G., and Parajka, J. (2006). Spatio-temporal variability of event runoff coefficients, *Journal of Hydrology*, 331, 591-604.
- Mohammadi, M. A. and Kavian, A. (2010). Study of temporal variations of runoff and sediment at the plot scale (Case study: in the Moarref Khamesan basin), Proceedings of the 12th Soil Science Congress of Iran, 3-5 September, Tabriz, Iran, 1788-1786, (In Farsi).
- Page, A. L. (1982). *Method of soil analysis*, Part 2: chemical and microbiological properties, Soil Science Society of American Madison, Wisconsin, USA.
- Page, A. L., Miller, R. H., and Keeney, D. R. (1986). *Methods of Soil Analysis*, Part 2, Chemical Methods, 2nded, Agronomy Monograph, 9, American Society of Agronomy and Soil Science Society of American, Madison, WI.
- Peres-Latorre, F. J., De Castro, L., and Delgado, A. (2010). A comparison of two variable intensity rainfall simulators for runoff studies, *Soil and Tillage Research*, 107, 11-16.
- Raeesiyan, R. (2005). Study of ground slope, soil moisture conditions and land use effects on runoff initiation time, Proceedings of the 3th National Conference of Erosion and Sediment, 28-31 August, Tehran, Iran, 305-309, (In Farsi).
- Refahi, H. G. (2003). *Soil erosion by water and conservation*, Tehran University Press, 13-135, (In Farsi).
- Rodriguez, A. R., Arbelo, C. D., Guerra, J. A., Mora, J. L., Notario, J. S., and Armas, C. M. (2006). Organic carbon stocks and soil erodibility in Canary Islands Andolos, *Catena*, 66 (3), 228-235.
- Rohipour, H. and Asadi, H. (2009). Interaction of rainfall and runoff in the process of soil erosion and sediment production using of rainfall and runoff simulator, Proceedings of the 11th Soil Science Congress of Iran, Gorgan, Iran, 1788-1786, (In Farsi).
- Rubio, J. L., Forteza, J., Andreu, V., and Cerni, R. (1997). Soil profile characteristics influencing runoff and soil erosion after forest fire: A case study Valencia Spain, *Soil Technology*, 11, 67-78.
- Sadeghi, S. H. R., Mohammadpour, K., and Dianaty-Tilaki, G. E. (2010). Temporal variability of runoff coefficient in the summer pastures of Kadir, Proceedings of the 6th National Conference of Science and Watershed Engineering and 4th National Conference of Erosion and Sediment, 28-29 April, Tehran, Iran, 52-60, (In Farsi).
- Santos, F. L., Reis, J. L., Martins, O. C., Castanheria, N. L., and Serralherio, R. P. (2003). Comparative assessment of infiltration, runoff and erosion of sprinkler irrigation soils, *Biosystems Engineering*, 86 (3), 355-364.
- Stakland, S. K. (2010). *Effect of mica content on surface infiltration of soils in northwestern Kern County, California*, A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree Utah State University.
- Vaezi, A. R., Bahrami, H. A., Sadeghi, S. H. R., and Mahdian, M. H. (2008). Spatial variations of runoff in a part of calcareous soils of semi-arid region in

- northwest of Iran. *Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources*, 15 (5), (In Farsi).
- 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.
- Wei, L., Zhang, B., and Wang, M. (2007). Effects of antecedent soil moisture on runoff and soil erosion in alley cropping systems, *Agricultural Water management*, 94, 54-62.
- Wuest, S. B., Williams, J. D., and Gollany, H. T. (2006). Tillage and perennial grass effects on ponded infiltration for seven semi-arid loess soils, *Journal of Soil and Water Conservation*, 61, 218-223.