

تغییرپذیری زمانی تولید رواناب تحت تأثیر شیب در خاک‌های با بافت مختلف

علی‌رضا واعظی^۱، مجتبی کرد^{۲*} و محمد حسین مهدیان^۳

۱. دانشیار، گروه خاک‌شناسی دانشکده کشاورزی دانشگاه زنجان

۲. دانشجوی دکتری، گروه خاک‌شناسی دانشکده کشاورزی دانشگاه زنجان

۳. استاد پژوهش سازمان تحقیقات، ترویج و آموزش کشاورزی، وزارت جهاد کشاورزی

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۰/۲۲ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۵/۳/۲۹)

چکیده

زمان آغاز و شدت تولید مشخصه‌هایی از رواناب بوده که تحت تأثیر تغییرات خصوصیات فیزیکی خاک طی زمان بارندگی قرار می‌گیرند. شدت تغییرات زمانی این مشخصه‌ها بسته به بافت خاک و شیب سطح می‌تواند تغییر کند. این پژوهش با هدف بررسی تغییرات زمانی تولید رواناب در خاک‌های با بافت لوم‌رسی، لوم و لوم‌شنی در شیب‌های ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۵ و ۳۰ درجه تحت باران شبیه‌سازی شده با شدت ۴۰ میلی‌متر در ساعت در شرایط آزمایشگاهی به انجام رسید. نتایج بدست آمده نشان داد که بافت خاک و شیب سطح اثر معنی‌داری بر زمان آغاز ($P < 0/05$) و شدت تولید رواناب ($P < 0/05$) دارد. زمان آغاز رواناب در خاک لوم رسی کمترین (۱۶ دقیقه) و در خاک لوم شنی بیشترین (۴۶ دقیقه) است. زمان آغاز رواناب به شدت تحت تأثیر شیب بوده و با افزایش شیب به صورت معنی‌داری کاهش یافت ($P < 0/01$). روابطی معنی‌دار و منفی بین شیب و زمان آغاز رواناب در خاک لوم‌رسی ($R^2 = 0/86$)، لوم ($R^2 = 0/86$) و لوم‌شنی ($R^2 = 0/98$) مشاهده شد ($P < 0/01$). بیشترین تأثیر شیب بر کاهش زمان آغاز رواناب در خاک لوم شنی (۶۳ درصد) و کمترین آن در خاک لوم رسی (۲۸ درصد) مشاهده شد. روابطی معنی‌دار و مثبت بین شیب و شدت تولید رواناب در خاک لوم‌رسی ($R^2 = 0/89$)، لوم ($R^2 = 0/95$) و لوم‌شنی ($R^2 = 0/94$) مشاهده شد ($P < 0/01$). نقش شیب در افزایش تولید رواناب در خاک لوم رسی (۱۹ درصد) بیشترین و در خاک لوم کمترین (۱۵ درصد) است. الگوی تغییرات زمانی رواناب طی بارندگی تحت تأثیر بافت خاک و درجه شیب قرار گرفت. افزایش تدریجی رطوبت خاک و تخریب شدید ساختمان خاک دلایل افزایش رواناب در زمان‌های اولیه بارندگی در خاک لوم رسی می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: باران شبیه‌سازی شده، تخریب ساختمان خاک، زمان آغاز رواناب، شدت تولید رواناب

مقدمه

فرسایش خاک بر اثر بارش و رواناب یکی از جدی‌ترین مشکلات زیست‌محیطی دوره کنونی حیات بشری است، به نحوی که با روند روزافزون فرسایش خاک، مناطق زیادی در آینده نه‌چندان دور حاصلخیزی خود را از دست خواهند داد (Ragab et al., 2003). رواناب از عوامل مهم انتقال دهنده ذرات خاک به‌ویژه از زمین‌های بدون پوشش است. تشکیل رواناب نتیجه آن بخش از بارش وارد شده بر سطح خاک است که در خاک نمی‌تواند نفوذ کرده و به دلیل وجود شیب، جریان می‌یابد. این پدیده نقشی مهم در هدر رفت خاک و عناصر غذایی خاک دارد. بررسی رواناب به‌عنوان یکی از عوامل اصلی فرساینده خاک امری اجتناب‌ناپذیر بوده (Girmay et al., 2009) و در برنامه‌ریزی حفاظت خاک در حوزه‌های آبخیز از اهمیت زیادی برخوردار

است. میزان رواناب حاصل از باران تحت تأثیر عوامل مختلف از جمله شدت باران، درصد پوشش گیاهی، ویژگی‌های خاک (بافت، ساختمان، نفوذپذیری، ماده آلی و محتوای رطوبت اولیه)، میزان تبخیر و تعرق و شرایط پستی و بلندی زمین قرار دارد (Perez-Latorre et al., 2010).

ویژگی‌های خاک از جمله بافت و توزیع اندازه ذرات از عوامل مهم مؤثر بر نفوذ آب باران و تشکیل رواناب است (Huang et al., 2013). پژوهش‌ها نشان داده‌اند بین رواناب و رسوب و مواد مادری خاک‌ها وابستگی وجود دارد، به‌طوری‌که با افزایش میزان ذرات سیلت و رس خاک، تولید رواناب افزایش می‌یابد. این در حالی است که بخش‌شن، منجر به کاهش تولید رواناب می‌شود (Duiker et al., 2001). پژوهش‌های انجام شده در واحدهای مارنی نشان داد که هر چه مقدار سیلت و رس بیش‌تر باشد، به دلیل کاهش قابلیت جذب آب، زمان شروع رواناب کم‌تر و حجم رواناب افزایش می‌یابد (Asadi et al., 2007). ذرات درشت‌تر خاک نیز عامل دیگر تعیین‌کننده

همچنین، بررسی‌ها نشان داد که افزایش شیب از پنج تا ۳۰ درصد، تأثیر اندکی بر افزایش شدت رواناب دارد (Sheridan *et al.*, 2003). مقایسه تأثیر شیب، پوشش گیاهی، بافت خاک و رطوبت اولیه بر رواناب با استفاده از شبیه‌ساز باران نشان داد که درصد شیب، همبستگی پایینی با رواناب دارد (Vahabi and Mahdian, 2008).

با وجود آن که چگونگی و میزان وقوع رواناب در یک سطح را می‌توان تحت باران‌های طبیعی مورد اندازه‌گیری قرار داد، چنین اندازه‌گیری‌هایی اغلب زمان‌بر و پرهزینه بوده (Sheridan *et al.*, 2008) و قابل تکرار نیز نمی‌باشد. از این‌رو، شبیه‌سازهای باران به عنوان ابزاری در پژوهش‌های هدر رفت خاک و فرآیندهای مربوط به آن به‌طور وسیع مورد استفاده قرار می‌گیرد. سرعت، کارایی، قابلیت تداوم باران و امکان تکرارپذیری از دیگر مزایای دستگاه‌های شبیه‌ساز باران است (Seeger, 2007).

به‌طور کلی، مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که عوامل متعددی از جمله شیب زمین و خصوصیات خاک در تولید رواناب نقش دارد. شناخت این عوامل می‌تواند در ارائه راه‌کارهایی برای کاهش رواناب مفید باشد. اگر چه در پژوهش‌های پیشین قابلیت خاک‌ها در تولید رواناب مورد بررسی قرار گرفته، لیکن در اغلب موارد رابطه کمی بین شاخص‌های رواناب (زمان آغاز و حجم رواناب) و شیب به‌ویژه در خاک‌های مناطق نیمه‌خشک ارائه نشده است. از سوی دیگر، شدت تغییرات زمانی رواناب در خاک‌های مختلف بیانگر تغییرات وضعیت ساختمان، رطوبت و در نتیجه نفوذپذیری خاک طی بارندگی بوده که مورد بررسی دقیق قرار نگرفته است. از این‌رو، این پژوهش با بهره‌مندی از دستگاه شبیه‌ساز باران با هدف کمی‌سازی رابطه بین شاخص‌های رواناب و شیب و بررسی روند تغییرات رواناب در برخی خاک‌های نواحی نیمه‌خشک اجرا شده است.

مواد و روش‌ها

طرح آزمایشی

برای بررسی تأثیر درجه شیب در خاک‌های مختلف بر شاخص‌های رواناب، بررسی آزمایشگاهی در سه خاک با بافت مختلف شامل لوم شنی، لوم رسی و لوم تحت پنج درجه شیب (۵، ۱۰، ۱۵، ۲۵ و ۳۰ درجه) در ابعاد فلوم با دو تکرار در قالب طرح کاملاً تصادفی با استفاده از شبیه‌ساز باران انجام شد.

میزان رواناب در خاک‌ها هستند. با افزایش سنگریزه سطحی و زیرسطحی، رواناب به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابد. با این حال، نقش سنگریزه سطحی نسبت به سنگریزه زیرسطحی از نظر تولید رواناب مهم‌تر است (Mohammadi and Kaviani, 2010). علاوه بر ذرات معدنی خاک، مقدار تولید رواناب تحت تأثیر خصوصیات شیمیایی خاک نیز قرار می‌گیرد. در مطالعه‌ای نشان داده شد که ماده آلی و آهک در کنار شن درشت به‌عنوان عوامل مهم مؤثر بر تولید رواناب در خاک‌های نواحی نیمه‌خشک است (Vaezi *et al.*, 2013).

میزان وقوع رواناب در کنار ویژگی‌های خاک به‌شدت تحت تأثیر درجه شیب زمین قرار می‌گیرد. در مورد اثر شیب بر شدت رواناب عقیده بر این است که با افزایش شیب زمین به دلیل کاهش فرصت نفوذ، شدت رواناب افزایش می‌یابد. پژوهش‌های مختلف نیز مؤید نقش مؤثر شیب بر رواناب است. بررسی تولید رواناب در بوته‌زارهای نیمه‌خشک اسپانیا با استفاده از باران‌ساز نشان داد که شیب زمین در کنار پوشش گیاهی و نوع خاک بر مقدار رواناب اثر می‌گذارد. بیشترین مقدار رواناب و فرسایش در کرت‌های با شیب بالاتر اتفاق افتاد (Navas, 1993). در پژوهشی، تولید رواناب در پنج شیب مختلف و در دو شدت بارش ۲۴ و ۶۰ میلی‌متر در ساعت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که هدر رفت خاک بیش‌تر از رواناب تحت تأثیر شیب قرار دارد (Assouline and Ben-Hur, 2006).

بررسی رابطه شیب و سله سطح خاک بر رواناب و هدر رفت خاک با استفاده از شبیه‌ساز باران در مناطق تپه ماهوری فلات لسی چین نشان داد که با افزایش شیب از صفر تا ۳۰ درجه، رواناب و هدر رفت خاک بیش از یک و نیم برابر افزایش و با شکستن سله سطح خاک، تولید رواناب و هدر رفت خاک ۴۰ درصد کاهش یافت (Cheng *et al.*, 2008). برخی از پژوهشگران نیز نتایج متفاوتی از تأثیر شیب زمین بر رواناب ارائه داده‌اند. در این ارتباط، بررسی رواناب سطوح ناهموار و مسطح در دو شیب پنج و ۲۰ درصد با پنج بارش شبیه‌سازی شده نشان داد که تفاوت آماری در مقدار رواناب بین شیب‌ها وجود ندارد (Gomez and Nearing, 2005). در مطالعه‌ای شدت وقوع رواناب در شیب‌های ۱۵ تا ۸۵ درصد مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که تفاوت معنی‌داری بین شیب‌ها از نظر شدت رواناب وجود ندارد. در این پژوهش، شستشوی لایه اندود سطحی در شیب‌های بالا علت این موضوع گزارش شده است. با افزایش شیب، کاهش رواناب در خاک‌های حساس به تشکیل لایه اندوده به شدت بارندگی نیز وابسته است (Grosch and Jarrett, 1994).

نسبتاً بالایی دارند، اما با توجه به نفوذپذیری خاک‌های منطقه، اکثر این بارش‌ها در اولین رخداد فرسایش‌زا نیستند و به همین دلیل شدت ۴۰ میلی‌متر بر ساعت بر اساس آزمایشات پیشین برای دستیابی به حداقل شدت باران فرسایش‌زا انتخاب شد. برای حذف اثر رطوبت اولیه بر رواناب، مقدار رطوبت خاک‌ها یکسان‌سازی شد. برای این کار خاک فلوم‌ها پنج روز پیش از اجرای آزمایش اشباع و طی این مدت برای جلوگیری از تبخیر، سطح آن‌ها با استفاده از پلاستیک پوشانده شد. برای اندازه‌گیری شاخص‌های رواناب، ابتدا زمان آغاز رواناب در هر آزمایش شبیه‌سازی باران ثبت شد. سپس، در بازه‌های زمانی ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲، ۳، ۴، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ دقیقه و در ادامه تا زمان ثابت شدن میزان رواناب، نمونه‌های رواناب برداشت شد. شدت تولید رواناب (میلی‌متر بر ساعت) بر مبنای حجم رواناب، زمان وقوع و سطح فلوم تعیین شد. بازه‌های زمانی به صورتی انتخاب گردید تا بتوان تغییرات رواناب را به خصوص در زمان‌های اولیه شروع رواناب مورد بررسی دقیق‌تر قرار داد.

اندازه‌گیری ویژگی‌های خاک‌ها

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها در آزمایشگاه اندازه‌گیری شد. برای این منظور، توزیع اندازه ذرات اولیه (شن، سیلت و رس) به روش هیدرومتر و جرم مخصوص ظاهری در محل نمونه‌برداری خاک به روش سیلندر تعیین شد. متوسط قطر خاکدانه‌ها بر اساس جداسازی خاکدانه‌های هر بخش و تعیین میانگین وزنی قطر (MWD)^۲ خاکدانه‌ها به دست آمد. پایداری خاکدانه در خاکدانه‌هایی با قطر بین شش تا هشت میلی‌متر بر اساس تعیین میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های پایدار در آب به روش الک تر (Amezketta *et al.*, 1996) با استفاده از سری الک‌ها (۸، ۶، ۴، ۲، ۱، ۰/۶ و ۰/۲۵ میلی‌متر) به مدت یک دقیقه با توان ۲۰ دور در دقیقه تعیین شد. انتخاب این مدت به دلیل پایداری بسیار پایین خاکدانه‌های مورد بررسی بود (Vaezi *et al.*, 2013). هدایت هیدرولیکی اشباع به روش بار ثابت اندازه‌گیری شد. واکنش خاک در گل اشباع با استفاده از pHسنج و هدایت الکتریکی در عصاره گل اشباع با استفاده از ECسنج اندازه‌گیری شد. ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) به روش استات سدیم یک نرمال در pH=۸/۲ اندازه‌گیری شد (Rhoades, 1982). برای محاسبه درصد سدیم تبادلی (ESP)، غلظت سدیم با استفاده از دستگاه فلیومتور (Chapman and Pratt, 1978) تعیین شد. ماده آلی به روش والکی-بلاک (Nelson and Sommers, 1982)، آهک بر مبنای کربنات

نمونه‌برداری خاک

برای این منظور سه خاک یاد شده در محدوده دانشگاه زنجان در سال ۱۳۹۲ مورد شناسایی قرار گرفت. نمونه‌های خاک از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متر برداشت شد. خاک‌ها به فلوم‌های^۱ فلزی به طول ۱۶۰، عرض ۶۵ و عمق ۳۰ سانتی‌متر منتقل شد. این ابعاد بر مبنای برخی مطالعات پیشین بود که در آن‌ها فلوم‌های آزمایشگاهی دارای یک تا دو متر طول، نیم تا یک متر عرض و بیست تا پنجاه سانتی‌متر عمق در نظر گرفته شده بود (Adekalu *et al.*, 2007; Dunjo *et al.*, 2004; Kato *et al.*, 2009). برای یکسان‌سازی شرایط سطح خاک، سنگریزه سطحی از خاک فلوم‌ها جمع‌آوری شد. پیرامون فلوم‌ها با استفاده از ورق‌های گالوانیزه مسدود شد. در زمان ریختن خاک به داخل فلوم سعی شد تا جرم مخصوص ظاهری خاک با ایجاد تراکم یکنواخت با جرم مخصوص ظاهری خاک مزرعه مشابه باشد (Lili *et al.*, 2016). در انتهای هر فلوم تجهیزات جمع‌آوری رواناب و رسوب شامل قیف و مخزن نصب شد (شکل ۱).



شکل ۱- نمای از فلوم‌های آزمایشی پس از اعمال باران

اندازه‌گیری رواناب

برای اعمال باران، یک دستگاه شبیه‌ساز باران به ابعاد ۱۴۰ در ۱۷۵ سانتی‌متر طراحی شد. دستگاه شبیه‌ساز باران از یک سطح بارش با حدود ۹۰۰ نازل تشکیل شده بود که در ارتفاع ۲۸۰ سانتی‌متری از سطح زمین قرار داشت. قطر قطرات ۲/۶۵ میلی‌متر بود. به نظر می‌رسد با وجود چنین قطراتی شبیه به قطر قطرات باران، رفتار باران از نظر تخریب ساختمان خاک سطحی و وقوع رواناب و فرسایش بهتر نمایان شود. دستگاه باران‌ساز به سامانه‌ای مکانیکی برای تنظیم شیب فلوم‌ها مجهز شد. برای بررسی رواناب، از باران با شدت ۴۰ میلی‌متر بر ساعت استفاده شد. بررسی شدت‌های باران منطقه نشان داد اگر چه رخدادهای باران با شدت کمتر از ۴۰ میلی‌متر بر ساعت فراوانی

تغییرات شاخص‌های رواناب بین خاک‌ها

نتایج تجزیه واریانس تغییرات شاخص‌های رواناب در درجات شیب و بافت‌های مختلف خاک نشان داد که بین خاک‌های مورد بررسی از نظر زمان آغاز رواناب و ارتفاع رواناب تفاوتی معنی‌دار در سطح یک درصد وجود دارد (جدول ۲). کمترین زمان وقوع رواناب در خاک لوم رسی (۱۱/۳۲ دقیقه پس از آغاز باران) و طولانی‌ترین زمان آغاز رواناب در خاک لوم شنی (۳۵/۱۵ دقیقه) مشاهده شد (شکل ۲-الف). کاهش سریع نفوذپذیری خاک لوم رسی عامل اصلی آغاز سریع رواناب و افزایش حجم آن نسبت به سایر خاک‌ها بود (شکل ۲-ب). اگرچه جزء رس در اغلب خاک‌ها می‌تواند به خاکدانه‌سازی و افزایش پایداری ساختمان خاک و کاهش میزان هدر رفت خاک کمک کند (Kirkby and Morgan, 2010)، لیکن به نظر می‌رسد مقدار رس خاک‌های مورد مطالعه به‌تنهایی برای تثبیت خاکدانه‌ها در برابر تخریب ناشی از قطرات باران کافی نباشد (Mamedov *et al.*, 2001). تخریب سریع خاکدانه‌ها در خاک لوم رسی در اثر ضربه قطرات باران و وقوع پدیده پاشمان می‌تواند عاملی دیگر برای تشکیل اندوده سطح (Perez-Latorre *et al.*, 2010) و کاهش نفوذپذیری ذاتی خاک طی بارندگی باشد. در خاک لوم شنی تولید رواناب کمترین (۶/۱۴ میلی‌متر) بوده که علت این مسئله ناشی از هدایت هیدرولیکی اشباع بالاتر در این خاک می‌باشد. فراوانی بیش‌تر ذرات درشت (سنگریزه و شن) در این خاک و در نتیجه وجود منافذ درشت بیشتر، عامل اصلی زهکشی آسان آب نفوذ یافته و افزایش زمان آغاز رواناب و کاهش میزان تولید رواناب است (Santos *et al.*, 2003). نتایج این پژوهش، یافته‌های (Vaezi, 2014) در خاک‌های کشاورزی مناطق نیمه‌خشک شمال غرب ایران را در مورد نقش توزیع اندازه ذرات بر روی میزان نفوذ نهایی و تولید رواناب تأیید می‌کند.

تغییرات شاخص‌های رواناب بین شیب‌ها

نتایج نشان داد که با احتمال ۹۹ درصد شیب بر زمان آغاز تأثیر دارد (جدول ۲). به‌طور کلی، زمان آغاز رواناب با افزایش شیب کاهش یافت. طولانی‌ترین زمان ظهور رواناب در شیب پنج درجه (۳۰/۶۱ دقیقه) و کمترین زمان در شیب ۳۰ درجه (۱۸/۳۵ دقیقه) مشاهده شد. معمولاً رواناب هنگامی تشکیل می‌شود که با افزایش رطوبت خاک، نفوذپذیری خاک به کمتر از شدت بارندگی برسد (Martinez-Murillo *et al.*, 2013). با افزایش درجه شیب، به دلیل افزایش تأثیر نیروی گرانشی زمین بر آب باران، مدت ماندگاری روی سطح خاک کاهش یافته و در نتیجه به دلیل کوتاه شدن فرصت نفوذ آب باران، رواناب سریع‌تر به

کلسیم معادل به روش خنثی‌سازی با اسید کلریدریک یک نرمال و گچ نیز به روش استون در خاک‌ها اندازه‌گیری شد (Jackson, 1967).

تجزیه و تحلیل داده‌ها

داده‌های حاصل از انجام آزمایش ابتدا در نرم‌افزار Excel 2007 دسته‌بندی گردید و بانک اطلاعاتی تهیه شد. قبل از هرگونه آنالیز آماری، نرمال بودن داده‌ها با استفاده از بررسی چولگی و کشیدگی و تحلیل هیستوگرام فراوانی بررسی شد. از آزمون همگنی واریانس (Levene) برای بررسی همگنی واریانس تیمارهای مورد آزمایش استفاده شد. تجزیه واریانس با استفاده از آزمون ANOVA و مقایسه میانگین‌ها بین بافت‌های خاک و نیز بین درجات شیب از نظر شاخص‌های رواناب با استفاده از آزمون دانکن در سطح پنج درصد انجام شد. برای تحلیل‌های آماری از نرم‌افزار SPSS استفاده شد.

نتایج و بحث

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها

جدول (۱) ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد بررسی را نشان می‌دهد. خاک‌های مورد بررسی از نظر ماده آلی فقیر (۱۰/۰۳-۰/۷۴) و دارای حدود ۱۰ درصد آهک و هشت درصد گچ هستند. بر این اساس، خاک‌های مورد مطالعه در گروه خاک‌های آهکی (Nazif *et al.*, 2014) قرار می‌گیرند. خاک‌ها دارای مقادیر نسبتاً زیادی سنگریزه (۱۲/۷ تا ۱۸/۲ درصد) هستند. مقدار جرم مخصوص ظاهری از ۱/۳۷ در خاک لوم رسی تا ۱/۴۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب در خاک لوم شنی تغییر می‌کند. جرم مخصوص ظاهری نسبتاً بالا در خاک لوم شنی به دلیل وجود درصد بالای شن (۷۱ درصد) و سنگریزه (۱۸ درصد) است. متوسط قطر خاکدانه در حالت خشک که معیاری از فرآیند خاکدانه‌سازی است، در خاک لوم شنی کمترین مقدار (۰/۹۵ میلی‌متر) و در خاک لوم بیشترین مقدار (۱/۹۳ میلی‌متر) است. پایداری خاکدانه‌ها بر مبنای میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های پایدار در آب (MWD) در تمام خاک‌ها بسیار پایین (از ۰/۲۶ میلی‌متر در خاک لوم شنی تا حداکثر ۰/۷۴ میلی‌متر در خاک لوم) است. وجود مقادیر پایین ماده آلی و رس در خاک لوم شنی می‌تواند دلیل اصلی پایین بودن درجه خاکدانه‌سازی و تشکیل خاکدانه‌های ناپایدار در آن باشد (Fullen and Booth, 2006). خاک‌ها دارای مقادیری نسبتاً زیاد از سدیم تبدالی (بین هشت تا ۱۰ درصد) بوده که با توجه به پایین بودن مقدار ماده آلی می‌توان انتظار داشت که حساسیت خاک‌ها به فرآیندهای فرسایش آبی بالا باشد.

در زمان ظهور رواناب مشاهده نگردید. بین زمان آغاز رواناب و درجه شیب رابطه‌ای قوی و معنی‌دار مشاهده شد ($R^2=0/99$).

وقوع می‌پیوندد (شکل ۳). تغییرات زمان آغاز رواناب با افزایش شیب، تا شیب ۲۵ درجه مشهود بوده و از آن پس تفاوتی آشکار

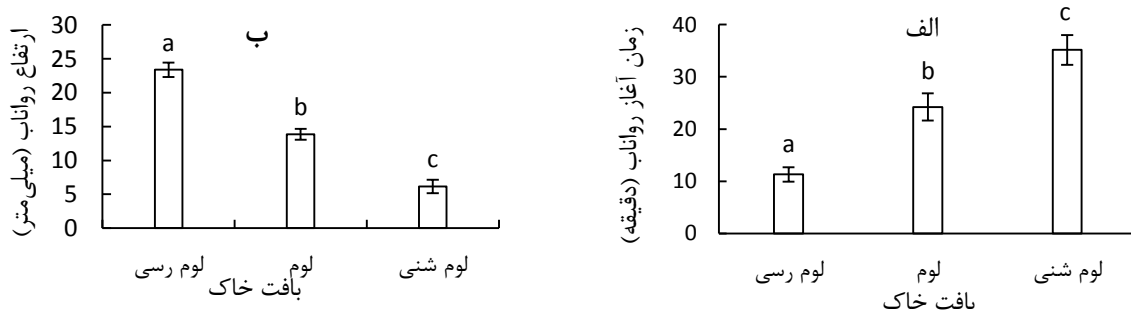
جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد بررسی

بافت خاک			ویژگی‌های خاک
لوم رسی	لوم	لوم شنی	
۴۱/۲۵	۳۶/۶۰	۷۱/۱۲	شن (%)
۲۱/۶۳	۴۳/۵۷	۱۶/۵۰	سیلت (%)
۳۷/۱۲	۱۹/۸۳	۱۲/۳۸	رس (%)
۱۲/۶۷	۱۴/۵۳	۱۸/۲۴	سنگریزه (%)
۱/۳۱	۱/۳۷	۱/۴۴	جرم مخصوص ظاهری ($g\ cm^{-3}$)
۱/۶۵	۱/۹۳	۰/۹۵	متوسط قطر خاکدانه (mm)
۰/۵۷	۰/۷۴	۰/۲۶	میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های پایدار در آب (mm)
۱/۸۲	۲/۷۸	۳/۷۳	هدایت هیدرولیکی اشباع ($cm\ h^{-1}$)
۹/۸۶	۷/۹۲	۸/۴۶	درصد سدیم تبدیلی
۰/۷۴	۱/۰۳	۰/۸۷	ماده آلی (%)
۱۰/۴۷	۱۱/۲۳	۹/۷۸	آهک (%)
۹/۶۷	۸/۲۷	۷/۵۶	گچ (%)

جدول ۲- تجزیه واریانس تغییرات شاخص‌های رواناب در درجات شیب و بافت‌های خاک و اثرات متقابل آن‌ها

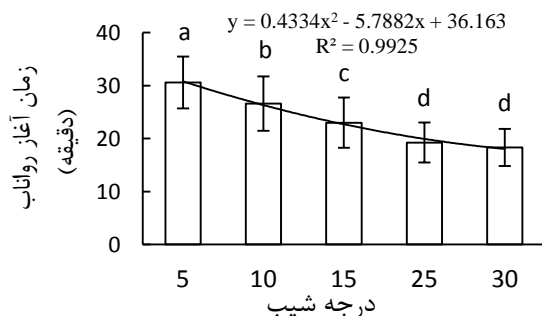
میانگین مربعات		بافت خاک	متغیر
درجه شیب × بافت خاک	درجه شیب		
۹/۹۶۱*	۱۵۷/۵**	۱۴۲۳/۶**	زمان آغاز رواناب
۶۱/۳۱ ^{ns}	۲۲۶۳/۱۹**	۸۴۶۷۳/۶۰**	ارتفاع رواناب

*: معنی‌دار با احتمال ۹۵ درصد، **: معنی‌دار با احتمال ۹۹ و ns: عدم وجود تفاوت معنی‌دار.



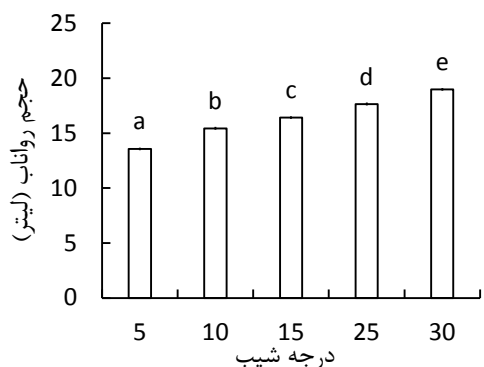
شکل ۲- مقایسه میانگین زمان آغاز رواناب (الف) و ارتفاع رواناب (ب) به روش دانکن در خاک‌های مورد مطالعه (حروف متفاوت بیانگر وجود اختلاف معنی‌دار می‌باشد)

نتایج نشان داد که بین خاک‌ها از نظر تأثیر شیب بر زمان آغاز رواناب تفاوتی اساسی وجود دارد (شکل ۴). بررسی جداگانه نقش شیب بر زمان آغاز رواناب در خاک‌ها نیز بیانگر این موضوع است که در همه خاک‌ها با افزایش شیب، زمان آغاز رواناب به‌طور چشمگیری کاهش یافته و در نتیجه تولید رواناب به‌شدت افزایش یافت. نتایج بررسی‌های انجام شده نیز نشان داد زمان آغاز رواناب با افزایش شیب کاهش یافته و رابطه کاهش زمان آغاز رواناب با شیب به صورت خطی است (Zhao et al. 2014). در بررسی روند کاهش زمان آغاز رواناب با افزایش شیب در



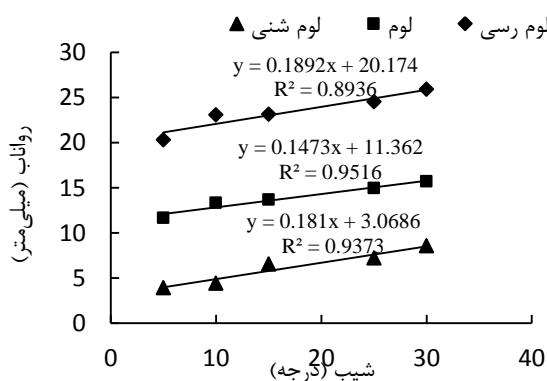
شکل ۳- مقایسه میانگین تغییرات زمان آغاز رواناب به روش دانکن در درجات مختلف شیب (حروف متفاوت بیانگر وجود اختلاف معنی‌دار می‌باشد)

مثبت شیب بر حجم رواناب است. محققین دلایل افزایش ضریب رواناب با افزایش شیب را ناشی از تمایل آب برای جاری شدن و کم شدن ذخیره چالاب در اثر افزایش شیب گزارش نمودند (Zhao et al., 2014).



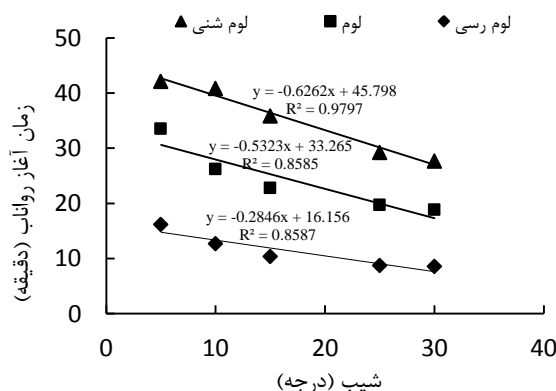
شکل ۵- مقایسه میانگین حجم رواناب به روش دانکن در شیب‌های مورد مطالعه (حروف متفاوت بیانگر وجود اختلاف معنی دار می‌باشد)

بررسی چگونگی تأثیر شیب سطح بر حجم رواناب در خاک‌های مختلف نشان داد که بین خاک‌ها از نظر تأثیر شیب بر شدت تولید رواناب تفاوتی اساسی وجود دارد (شکل ۶). رابطه قوی معنی دار بین تولید رواناب و شیب در خاک‌ها مشاهده شد. بر اساس معادلات برازش یافته می‌توان نتیجه گرفت که نقش شیب در افزایش تولید رواناب در خاک لوم رسی (۱۹ درصد) بیشترین و در خاک لوم کمترین (۱۵ درصد) است. در پژوهشی، Martinez (1998) با بررسی عوامل مؤثر بر رواناب در حوزه‌های آبخیز کوچک در مناطق نیمه‌خشک مدیترانه‌ای اسپانیا نشان داد که خاک‌های ریز بافت که دارای نفوذپذیری پایین و مواد آلی کمتری می‌باشند، آستانه شروع رواناب پایین‌تر و ضریب روانایی بالاتر نسبت به خاک‌های درشت بافت (با نفوذپذیری بیشتر و مواد آلی متوسط) دارند. در پژوهشی Ekwue and Harrilal, (2010) نیز نشان دادند که میزان رواناب با افزایش میزان رس به شدت کاهش می‌یابد.



شکل ۶- رابطه رواناب و شیب در خاک‌های مورد مطالعه

پژوهش حاضر، بیشترین کاهش در زمان آغاز رواناب در خاک لوم شنی مشاهده شد، به طوری که زمان آغاز رواناب در شیب ۳۰ درجه (۲۷/۶۸ دقیقه) به اندازه ۱۴/۴۵ دقیقه زودتر از شیب پنج درجه (۴۲/۱۳ دقیقه) بود. خاک لوم رسی کمترین تغییرات زمان آغاز رواناب (۷/۶۲ دقیقه) را با افزایش درجه شیب نشان داد. به عبارت دیگر، در این خاک، تولید رواناب پیش از آن که تحت تأثیر شیب سطح قرار گیرد، تحت تأثیر نفوذپذیری ذاتی خاک قرار داشت. مطابق با معادلات برازش شده، بیشترین تأثیر شیب بر کاهش زمان آغاز رواناب در خاک لوم شنی (۶۳ درصد) و کمترین آن در خاک لوم رسی (۲۸ درصد) مشاهده شد. خاک لوم رسی دارای کمترین میزان نفوذپذیری ذاتی (۱/۸۲ سانتی‌متر بر ساعت) بین خاک‌ها بود. این نتایج بیانگر این واقعیت است که وابستگی زمان آغاز رواناب به درجه شیب در خاک‌های با نفوذپذیری پایین، کمتر است.



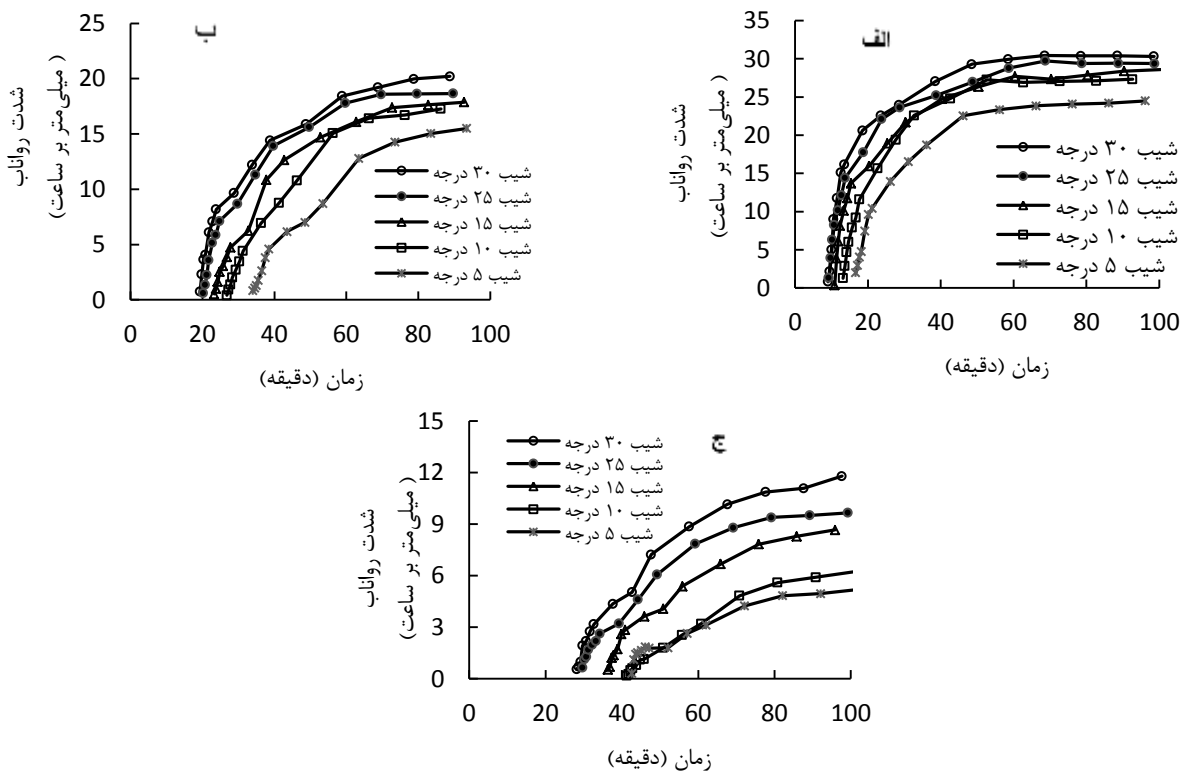
شکل ۴- رابطه زمان آغاز رواناب و شیب در خاک‌های مختلف

همچنین، شیب بر میزان تولید رواناب در خاک‌ها در سطح یک درصد اثری معنی‌داری دارد (جدول ۲). تولید رواناب با افزایش درجه شیب در خاک‌های مورد بررسی افزایش یافت. بیشترین حجم رواناب در شیب ۳۰ درجه (۱۸/۹۸ لیتر) و کمترین آن در شیب پنج درجه (۱۳/۵۷ لیتر) مشاهده شد (شکل ۵). با افزایش شیب، فرصت نفوذ آب باران کاهش یافته و در نتیجه تولید رواناب در خاک‌ها به شدت افزایش یافت. پژوهش‌های انجام شده در شمال چین نیز نشان داد که با افزایش شیب از ۵ به ۲۵ درجه تولید رواناب به دلیل کاهش میزان نفوذ و افزایش تشکیل سله افزایش یافته است (Cheng et al., 2008). نتایج بررسی عوامل مؤثر بر فرسایش خاک در بلژیک نشان داد که بین درصد شیب با رواناب و فرسایش خاک همبستگی مثبت وجود دارد (Nyssen and Vermeersch, 2010). یافته‌های محققان با استفاده از شبیه‌ساز باران مؤید تأثیر

زمان از آغاز بارندگی از یک سو محتوای رطوبتی خاک افزایش یافت و از سوی دیگر به دلیل تشکیل اندوده سطحی، به تدریج نفوذپذیری خاک کاهش یافت. به نظر می‌رسد تخریب شدید ساختمان خاک در اثر ضربه قطرات باران، عامل اصلی تشدید تولید رواناب در اوایل بارندگی باشد. در اواخر دوره بارندگی، به دلیل آن که شدت نفوذ آب به خاک به حد تقریباً ثابت رسید، تغییرات آشکاری در شدت تولید رواناب مشاهده نشد (Girmay *et al.*, 2009).

تغییرات زمانی شدت تولید رواناب

تغییرات شدت تولید رواناب طی بارندگی تحت تاثیر درجات شیب در هر یک از خاک‌های مورد مطالعه در شکل (۷) نشان داده شده است. در هر سه خاک مورد بررسی، با گذشت زمان شدت تولید رواناب افزایش یافته و این وضعیت در شیب‌های بالاتر تشدید شد. با توجه به این که شدت بارندگی طی مدت آزمایش ثابت بود (۴۰ میلی‌متر در ساعت)، تولید رواناب تحت تاثیر تغییرات زمانی نفوذ آب به خاک قرار داشت. با گذشت



شکل ۷- تغییرات زمانی شدت رواناب تحت تاثیر شیب در خاک لوم رسی (الف)، خاک لومی (ب) و خاک لوم شنی (ج) تحت باران با شدت ۴۰ میلی‌متر بر ساعت

نتایج نشان داد تفاوت اساسی در الگوی افزایش رواناب طی بارندگی با افزایش شیب در خاک‌ها مختلف وجود دارد. بیشترین تغییرات رواناب طی بارندگی در زمان‌های اولیه بارندگی در خاک لوم رسی مشاهده شد. در این خاک، بلافاصله پس از آغاز رواناب (۱۱/۳۲ دقیقه پس از شروع بارندگی)، در فاصله زمانی کمتر از پنج دقیقه، افزایش شدیدی در تولید رواناب مشاهده شد. این نتایج نشان‌دهنده افت شدید نفوذپذیری خاک طی این مدت است. اگرچه با گذشت زمان، محتوای رطوبتی خاک به تدریج افزایش یافته، لیکن تخریب سریع ساختمان خاک و در نتیجه افت شدید نفوذپذیری خاک از علل اصلی تشدید تولید رواناب در این خاک در اوایل بارندگی است (Yujie *et al.*, 2015). در خاک لوم شنی روند تغییرات شدت رواناب طی زمان بارندگی بسیار تدریجی بود. این نتایج

نتایج نشان داد تفاوت اساسی در الگوی افزایش رواناب طی بارندگی با افزایش شیب در خاک‌ها مختلف وجود دارد. بیشترین تغییرات رواناب طی بارندگی در زمان‌های اولیه بارندگی در خاک لوم رسی مشاهده شد. در این خاک، بلافاصله پس از آغاز رواناب (۱۱/۳۲ دقیقه پس از شروع بارندگی)، در فاصله زمانی کمتر از پنج دقیقه، افزایش شدیدی در تولید رواناب مشاهده شد. این نتایج نشان‌دهنده افت شدید نفوذپذیری خاک طی این مدت است. اگرچه با گذشت زمان، محتوای رطوبتی خاک به تدریج افزایش یافته، لیکن تخریب سریع ساختمان خاک و در نتیجه افت شدید نفوذپذیری خاک از علل اصلی تشدید تولید رواناب در این خاک در اوایل بارندگی است (Yujie *et al.*, 2015). در خاک لوم شنی روند تغییرات شدت رواناب طی زمان بارندگی بسیار تدریجی بود. این نتایج

نتیجه‌گیری کلی

بر اساس نتایج، بافت خاک و شیب سطح هر دو از عوامل مؤثر بر مشخصه‌های رواناب (زمان آغاز و شدت تولید رواناب) هستند. با افزایش درجه شیب، به دلیل افزایش تأثیر نیروی گرانشی زمین بر آب باران، مدت ماندگاری روی سطح خاک کاهش می‌یابد و در نتیجه به دلیل کوتاه شدن فرصت نفوذ آب باران، رواناب سریع‌تر به وقوع می‌پیوندد. کاهش زمان آغاز رواناب منجر به افزایش تولید رواناب می‌شود. کوتاه‌ترین زمان آغاز رواناب و بیشترین حجم تولید رواناب متأثر از افزایش شیب در خاک لوم رسی مشاهده شد. بین خاک‌ها از نظر تأثیر شیب بر زمان آغاز رواناب تفاوتی اساسی وجود داشت. بیشترین کاهش در زمان آغاز رواناب با افزایش شیب، در خاک لوم شنی مشاهده شد. این در حالی است که در خاک لوم رسی وضعیتی متفاوت مشاهده گردید. در این خاک تولید رواناب پیش از آن که تحت

تأثیر شیب سطح قرار گیرد تحت تأثیر نفوذپذیری ذاتی خاک قرار داشت. این خاک دارای کمترین میزان نفوذپذیری ذاتی بین سایر خاک‌ها بوده و از این رو وابستگی زمان آغاز رواناب به درجه شیب در این خاک، کمترین است. افزایش شیب در تمام خاک‌ها منجر به افزایش تولید رواناب شد. شدت تولید رواناب طی مدت بارندگی به دلیل تغییرات زمانی نفوذ، تغییر پیدا کرد. شدت تولید رواناب طی بارندگی از یک سو به دلیل افزایش رطوبت خاک و از سوی دیگر به دلیل تخریب ساختمان خاک و تشکیل اندوده سطحی افزایش یافت. شدت تولید رواناب در اوایل بارندگی بیشتر از زمان‌های دیگر است. این وضعیت در خاک لوم رسی به دلیل افت شدید نفوذپذیری خاک مشهود می‌باشد. تخریب بیشتر خاکدانه‌ها در خاک لوم رسی نسبت به دو خاک دیگر، عامل اساسی تفاوت روند افزایش رواناب در اوایل بارندگی نسبت به دو خاک دیگر است.

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.
- Amezket, E. Singer, M.J. and Le Bissonnais, Y. (1996). Testing a new procedure for measuring water-stable aggregation. *Soil Science Society of America Journal*, 60 (5): 888-894.
- Arnaez, J., Lasanta T., Ruiz-Flano, P. and Ortigosa, L. (2007). Factors affecting runoff and erosion under simulated rainfall in Mediterranean vineyards. *Soil and Tillage Research*, 93(2):324-334.
- Asadi, H., Mahammedi, 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).
- Assouline, S., and Ben-Hur, M. (2006). Effects of rainfall intensity and slope gradient on the dynamics of interrill erosion during soil surface sealing. *Catena*, 66, 211-220.
- Chapman, H.D. and Pratt, P.F. (1978). *Methods of analysis for soils, plants and waters*. Division of agricultural sciences. University of California. United State of America.
- Cheng, Q., Ma, W., and Cai, Q. (2008). The relative importance of soil crust and slope angle in runoff and soil loss: A case study in the hilly areas of the Loess Plateau, North China. *Geo. J.* 71, 117-125.
- Duiker, S.W., Flanagan, D.C., and Lal, R. (2001). Erodibility and infiltration characteristics of fire major soils of southwest Spain. *Catena*, 45, 103-121.
- Dunjo, G., Pardini, G. and Gispert, M. (2004). The role of land use-land cover on runoff generation and sediment yield at a micorplot scale, in a small Mediterranean catchment. *Journal of Arid Environment*, 57, 99-116.
- Ekwue, E.I. and Harrilal A. (2010). Effect of soil type, peat, slope, compaction effort and their interactions on infiltration, runoff and raindrop erosion of some Trinidadian soils. *Biosystem Engineering*, 105, 112 - 118.
- Fullen, M.A. and C.A. Booth. (2006). Grass ley set-aside and soil organic matter dynamics on sandy soils in Shropshire, UK, *Earth Surf. Process. Landforms*. 31: 570-578.
- 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.
- Gomez, J.A. and Nearing, M.A. (2005). Runoff and sediment losses from rough and smooth soil surfaces in a laboratory experiment. *Catena*, 59, 253-266.
- Grosh, J.L., and Jarrett A.R. (1994). Interrill erosion and runoff on very steep slopes. *Trans. ASAE*, 37(4), 1127-1133.
- Huang, J., Wu, P., and Xining. Z. (2013). Effects of rainfall intensity, underlying surface and slope gradient on soil infiltration under simulated rainfall experiments, *Catena*, 104, 93-102.
- Jackson, M.L. 1967. *Soil chemical analysis*. Prentice-Hall of India, Private Limited. New Delhi.
- Jordan, A. and Martinez, Z.L. (2008). Soil loss and runoff rates on unpaved forest roads in southern Spain after simulated rainfall. *Forest Ecology and Management*, 255, 913-919.
- Kato, H., Onda, Y., Tanaka, Y. and Asano, M. (2009). Field measurement of infiltration rate using an oscillating nozzle rainfall simulator in the cold, semiarid grassland of Mongolia. *Catena*, 76, 173-181.

- Kirkby, M. J. and Morgan, R. P. 2010. Soil erosion. John Wiley and Sons. New York.
- LiLi Mao, YuZhong Li, WeiPing Hao, Xu Rong Mei, Vincent F. Bralts, HaoRu Li, Rui Guo and TingWu Lei. (2016). An approximate point source method for soil infiltration process measurement. *Journal of Geoderma*, 264, 10-16.
- 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.
- Martinez, M. 1998. Factors Influencing Surface Runoff Generation in a Mediterranean Semi-arid Environment: Chicamo Watershed Spain. 12(5): 741-745.
- Martínez-Murillo, J.F., Nadal-Romero, E., Regüés, D., Cerdà, A. and Poesen, J. (2013). Soil erosion and hydrology of the western Mediterranean badlands throughout rainfall simulation experiments: a review. *Catena*, 106, 101-112.
- 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).
- Navas, N. (1993). Soil losses under simulated rainfall in semi-arid shrublands of the Ebro Valley, Spain. *Soil Use and Manage*, 9(4), 152-156.
- Nazif, W., Marzouk E.R., Perveen S., Crout N.M.J. and Young S.D. (2014). Zinc solubility and fractionation in cultivated calcareous soils irrigated with wastewater. *Journal of Science of The Total Environment*, 201, 310-319.
- Nelson, D.W., and Sommers, L.E. (1982). Total carbon, organic carbon, and organic matter. pp: 539-579. In: A. L. Page (ed.) *Methods of soil analysis. Part 2*. ASA and SSSA, Madison, WI.
- Nyssen, J., and Vermeersch, D. (2010). Slope aspect affects geomorphic dynamics of coal mining spoil heaps in Belgium. *Geomorphology*, 123(1-2), 109-121.
- Perez-Latorre, F.J., Castro, L.D., and Delgado, A. (2010). A comparison of two variable intensity rainfall simulators for runoff studies. *Soil and Till. Res.* 107, 11-16.
- Ragab, R., Bromley, J., Roiser, P., Cooper, J.D. and Gash J.H.C. (2003). Experimental study of water fluxes in a residential area: 1. Rainfall, roof runoff and evaporation: the effect of slope and aspect. *Hydrological Processes*, 17, 2409-2422.
- Rhoades, J.D. (1982). *Methods of soil analysis, Agronomy. Cation exchange capacity..* Number. 9, Part 2: chemical and mineralogical properties. 2nd ed., America. Society. Agronomy, Madison. WI, USA. 149-157.
- 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.
- Seeger, M. (2007). Uncertainty of factors determining runoff and erosion processes as quantified by rainfall simulations. *Catena*, 71, 56-67.
- Sheridan, G.J., SoH.B. and LochR J. (2003). Improved slope adjustment function for soil erosion prediction. *Aust. J. Soil Res.* 41, 1489-1508.
- Sheridan, G., Noske, P., Lane, P., and Sherwin, C. (2008). Using rainfall simulation and site measurements to predict annual inter rill erodibility and phosphorus generation rates from unsealed forest roads: Validation against in-situ erosion measurements. *Catena*, 73, 49-62.
- Vaezi, A.R. (2014). Modeling runoff from semi-arid agricultural lands in northwest Iran. *Pedospher*, 24 (5), 595-604.
- Vaezi, A.R., Hasanzadeh, H. and Mohammadi, M.H. (2013). Runoff variations in the soil textures samples in the plot scale under the same rainfall events. *Journal of Soil and Water Research*, 44(3), 245-254, (In Farsi).
- Vahabi, J. and Mahdian M.H. (2008). Rainfall simulation for the study of the effects of efficient factors on runoff rate. *Current Sci.* 95, 1439-1445.
- Zhao, X., Huang, J., Gao, X., Wu, P. and Wang. J. (2014). Runoff features of pasture and crop slopes at different rainfall intensities, antecedent moisture contents and gradients on the Chinese Loess Plateau: A solution of rainfall simulation experiments. *Catena*, 119, 90-96.
- Yaron, B., Bresler, E. and Shalhevet, J. (1966). A method for uniform packing of soil columns. *Soil Sci.* 101, 205-209.
- Yujie Wei., Xinliang Wu and Chongfa Cai. (2015). Splash erosion of clay-sand mixtures and its relationship with soil physical properties: The effects of particle size distribution on soil structure. *Catena*. 135, 254-262.