

تأثیر محتوای رطوبتی خاک بر تولید رواناب و هدررفت خاک از شیارها در کرت‌های آزمایشی صحرائی در دامنه‌های با شیب مختلف

علی‌رضا واعظی*^۱، زهرا حقانی^۲

تاریخ دریافت: ۹۷/۰۵/۳۰ تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۶/۰۴

۱-استاد، گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان

۲-دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: vaezi.alireza@gmail.com

چکیده

محتوای رطوبتی خاک، عامل فیزیکی مهمی در اغلب فرآیندها مانند نفوذپذیری و فرسایش خاک است. این مطالعه با هدف بررسی تأثیر محتوای رطوبتی خاک بر رواناب و کنده شدن خاک از شیارها در دامنه‌های با خاک‌های درشت‌دانه در منطقه نیمه‌خشک انجام شد. برای این منظور جویچه‌های کشت با طول ۶ متر در پنج کشتزار با شیب‌های متفاوت (۶/۱، ۱۰/۶، ۱۴/۸، ۲۰/۷ و ۲۷/۱ درصد) با چهار سطح رطوبتی شامل هواخشک (AD)، بین ظرفیت مزرعه و هواخشک (AD-FC)، ظرفیت مزرعه (FC) و رطوبت اشباع (SP) در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار احداث شدند. برای بررسی هدررفت خاک در دامنه‌ها از جریانی با دبی ثابت ۲ لیتر بر دقیقه استفاده شد. خاک دامنه‌ها دارای بافت درشت (با ۵۶ تا ۷۵ درصد شن) و سنگی (از ۲۲ تا ۵۷ درصد)، با ساختمان ضعیف و نفوذپذیری زیاد بودند. نتایج نشان داد که در دامنه‌های با شیب ۶/۱، ۱۴/۸ و ۲۰/۷ درصد با افزایش رطوبت خاک، هدررفت خاک کاهش می‌یابد. بیش‌ترین مقدار هدررفت خاک (گرم بر مترمربع در ثانیه) به‌ترتیب در رطوبت‌های AD-FC (۰/۰۱)، AD (۰/۳۰۶) و AD (۰/۰۴۵) مشاهده شد. با افزایش محتوای آب خاک، پیوستگی توده خاک افزایش یافت و بخش عمده رواناب به‌صورت زیرسطحی در شیارها جاری شد و در نتیجه رواناب سطحی و انتقال ذرات در شیارها کاهش یافت. این پژوهش نشان داد که در دامنه‌های با بافت درشت‌دانه با افزایش محتوای رطوبتی خاک، هدررفت خاک به‌شدت کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: بافت خاک، رطوبت اشباع، ساختمان خاک، سنگریزه، نفوذپذیری خاک

Effect of Soil Water Content on Runoff Production and Soil Loss from Rills in Field Experimental Plots in Different Slopes

AR Vaezi^{1*}, Z Haghani²

Received: August 21, 2018 Accepted: August 26, 2019

¹ Prof., Soil Sci. Dept., Faculty of Agric., University of Zanjan, Iran

² MSc. Student, Soil Sci. Dept., Faculty of Agric., University of Zanjan, Iran

*Corresponding Author, Email: vaezi.alireza@gmail.com

Abstract

Soil water content (SWC) is an important physical factor that plays an essential role in many processes such as infiltration and soil erosion. This study was conducted to investigate the effect of SWC on runoff and soil detachment from rills in coarse-grained soils in the semi-arid region. For this purpose, furrows with 6 m in length were installed in five rainfed farms with different slope steepness (6.1, 10.6, 14.8, 20.7 and 27.1%) treated with four moisture levels including air-dried (AD), between air-dried and field capacity (AD-FC), field capacity (FC) and saturation point (SP) in a completely randomized design with three replications. Flow rate with a discharge of 2 L min⁻¹ was used to investigate soil detachment from the farms. The soils were coarse texture (having 56-75% sand) and rocky (having 22-57%) with unstable structure and high infiltration rate. Based on the results, soil detachment decreased with increasing SWC in 6.1, 14.8 and 20.7 % slopes. The highest soil detachment rate (g m⁻²s⁻¹) in these lands was observed in AD-FC (0.01), AD (0.306) and AD (0.0045), respectively. By increasing SWC, the continuity and stability of soil mass of furrow increased, and runoff occurred mostly as subsurface flow in the rills. Surface runoff as well as the soil particle detachment decreased in the rills. Therefore, in the semi-arid slopes with coarse-grained soil, soil detachment rate decreases with increasing SWC.

Keywords: Gravel, Soil texture, Saturation moisture, Soil structure, Soil permeability

مقدمه

برآورد کردند. همچنین مورگان (۲۰۰۵) بیان کرد که فرسایش شیاری ۵۰ تا ۷۰ درصد فرسایش خاک را به خود اختصاص می‌دهد. به علاوه در فلات لسی چین سهم این فرسایش بیش‌تر از ۷۰ درصد فرسایش دامنه‌ای برآورد شده است (لی و همکاران ۲۰۱۰). رطوبت اولیه خاک عاملی مهم در شدت تولید رواناب و وقوع فرسایش شیاری است. رطوبت اولیه خاک تأثیری زیاد بر مقدار آب نفوذ یافته طی یک دوره بارش دارد. هرچه رطوبت اولیه خاک بیش‌تر باشد، سرعت نفوذ اولیه به دلیل کاهش اختلاف مکش کم‌تر خواهد بود و خاک زودتر به مرحله نفوذ نهایی می‌رسد (گوندولفو و ساوی ۲۰۰۰). میزان تأثیر رطوبت اولیه بر

فرسایش شیاری در کنار فرسایش بین‌شیاری، فرآیند اصلی فرسایش آبی در دامنه‌هاست (اوپسومر و همکاران ۲۰۰۳). این نوع فرسایش عبارت از جداسازی ذرات و انتقال آن‌ها توسط جریان متمرکز آب روی دامنه است که به شکل کانال فرسایش یافته باریک و دراز نمایان می‌شود. گسترش این نوع فرسایش به شدت بارندگی، سرعت جریان و خصوصیات هیدرولیکی جریان، ویژگی‌های شیب (لی و همکاران ۲۰۰۶) و ویژگی‌های خاک (رومر و همکاران، ۲۰۰۷) بستگی دارد. ویرتز و همکاران (۲۰۱۲) در جنوب اسپانیا میزان فرسایش شیاری را ۲۰ تا ۶۰ برابر فرسایش بین‌شیاری

را به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش داده و باعث افزایش رواناب و تحویل رسوب می‌شود. آن‌ها رطوبت اولیه خاک را یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر فرآیند فرسایش خاک بیان کردند. زیادت و تیمه (۲۰۱۳) به بررسی اثر شدت بارش، شیب، کاربری زمین و رطوبت پیشین خاک در فرسایش خاک و رواناب پرداختند. فرسایش خاک در زمین کشت شده به‌شدت تحت تأثیر رطوبت خاک و در زمین‌های کشت نشده، عمدتاً تحت تأثیر تندی شیب قرار گرفت. هاردیه و همکاران (۲۰۱۳) نشان دادند که وقوع جریان‌های ترجیحی به‌شدت یا مدت باران بستگی ندارد بلکه با میزان رطوبت خاک در ارتباط است. هلاواسیکوا و همکاران (۲۰۱۵) نیز نشان دادند هنگامی که شدت باران کم‌تر از هدایت هیدرولیکی اشباع خاک سنگی باشد، بالاترین جریان خروجی را می‌توان در توده خاک با بیش‌ترین مقدار سنگ و محتوای رطوبت اولیه زیاد پیش‌بینی کرد. صادقی و همکاران (۲۰۱۴) نیز به این نتیجه رسیدند که ارتفاع رواناب در ماه‌های اسفند و آبان به‌دلیل محتوای زیاد رطوبتی خاک (۲۵ و ۲۳ درصد) و پوشش ضعیف گیاهی، بالا (به‌ترتیب ۱۲/۵ و ۱۰/۲ میلی‌متر) بود. هم‌چنین آن‌ها نشان دادند که زمان آغاز رواناب در ماه‌های با پوشش سطحی اندک، به‌شدت وابسته به محتوای رطوبتی خاک است. عباسی و همکاران (۲۰۱۷) با بررسی تأثیر شیب و کاربری بر خصوصیات خاک، رواناب و رسوب نشان دادند که همبستگی رطوبت پیشین با میزان رسوب می‌تواند متفاوت باشد. بهتری و واعظی (۲۰۱۸) نشان دادند که تولید رواناب و هدررفت خاک به یک اندازه تحت تأثیر رطوبت اولیه خاک قرار نمی‌گیرند و در خاک دارای ساختمان ضعیف، نقش این عامل در هدررفت خاک بیش‌تر از تولید رواناب است.

بررسی منابع نشان می‌دهد اگرچه مطالعاتی در خصوص نقش رطوبت اولیه خاک در نفوذپذیری و فرسایش خاک در مقیاس کلی صورت گرفته است لکن اغلب بررسی‌های انجام شده در زمینه رطوبت اولیه در

نفوذ آب و فرسایش خاک به نوع خاک وابسته است. به نظر می‌رسد نقش رطوبت اولیه خاک در رواناب و فرسایش در خاک‌های ریزبافت بیش‌تر از سایر خاک‌ها باشد. اطلاعات اندکی در مورد نقش رطوبت اولیه خاک در فرسایش آبی وجود دارد. وی و همکاران (۲۰۰۷) با بررسی اثر رطوبت اولیه خاک بر تولید رواناب و فرسایش خاک در پنج نوع خاک با کاربری‌های مختلف در چین نشان دادند که در رخ‌دادهای مشابه، مقادیر رواناب و رسوب متفاوت است. این تغییرات به‌دلیل تفاوت معنی‌دار ($P < 0.05$) در رطوبت اولیه خاک بین رخ‌دادهای باران بود. یافته‌های ژو و وعو (۲۰۰۸) در حوزه‌های آبخیز شمال چین نشان داد که با افزایش رخ‌دادهای بارندگی، غلظت رسوب افزایش می‌یابد و میزان ذرات منتقله نیز بیش‌تر می‌شود. آن‌ها رطوبت اولیه خاک را عامل مهمی در این موضوع بیان کردند. ارشم و همکاران (۲۰۰۹) با بررسی میزان تولید رسوب در سه نوع خاک با بافت سبک، متوسط و سنگین تحت باران شبیه‌سازی شده در استان خوزستان به این نتیجه رسیدند که با بالا رفتن مقدار رطوبت خاک، تولید رسوب نیز افزایش می‌یابد. ژانگ و همکاران (۲۰۱۰) نشان دادند که همبستگی منفی ($P < 0.05$) بین رطوبت اولیه ذخیره شده خاک و رواناب سطحی ایجاد شده توسط بارندگی وجود دارد و هنگام وقوع بارندگی، ذخیره رطوبت خاک در بالادست شیب‌ها افزایش پیدا کرده و به‌تدریج در پایین‌دست شیب‌ها رو به کاهش می‌گذارد. نتایج پژوهش کاویان و همکاران (۲۰۱۰) نشان داد که با بهره‌گیری از سه متغیر درصد ماده آلی، رطوبت پیشین و رس خاک می‌توان میزان رواناب و فرسایش خاک را به‌ترتیب با ضریب تبیین ۰/۶۳۸ و ۰/۷۰۱ برآورد نمود. در پژوهشی ترومن و همکاران (۲۰۱۱) با بررسی رفتار دو نوع خاک از نظر رطوبت اولیه و فرآیندهای فرسایش و رواناب تحت باران شبیه‌سازی شده در گرجستان نشان دادند که افزایش رطوبت اولیه خاک (تا حد ۴۰ درصد) نفوذپذیری خاک

دامنه‌ها، وجود شیب یکنواخت دامنه و عرض یکنواخت برای پیاده‌سازی آزمایش بود. انتخاب این محدوده از شیب (بین ۵ تا ۲۵ درصد) به دلیل انجام کشت دیم در منطقه بود. مشاهدات اولیه خاک دامنه‌ها نشان از وجود بافت درشت و سنگریزه‌ای (شن لومی و لوم شنی) بود. متوسط بارش سالانه حدود ۲۷۰ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه ۱۱ درجه سانتی‌گراد است و بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی دومارتن، منطقه دارای اقلیم سرد و خشک است (زرین‌آبادی و واعظی ۲۰۱۶).

احداث کرت

به منظور تعیین چهار سطح رطوبتی خاک، پیش از آغاز آزمایش ابتدا در گوشه‌ای از هر دامنه، کرتی با ابعاد ۱۰۰ سانتی‌متر در ۱۰۰ سانتی‌متر احداث شد. ابتدا رطوبت خاک در حالت هواخشک به روش وزنی تعیین شد. سپس کرت کاملاً غرقاب شد و بلافاصله پس از نفوذ آب، نمونه‌ای از خاک برای تعیین حد اشباع برداشت شد. سطح کرت با پلاستیک مشکی پوشانده شد. در فاصله زمانی نیم‌روز تا یک هفته نمونه‌برداری خاک آغاز و ادامه پیدا کرد. در شرایطی که رطوبت خاک در فاصله دو اندازه‌گیری پیاپی تغییر اساسی پیدا نکرد، رطوبت خاک نمایان‌گر ظرفیت نگه‌داری آب خاک یا ظرفیت مزرعه در نظر گرفته شد (لیو و همکاران ۲۰۱۱). رطوبت بین شرایط هواخشک و ظرفیت مزرعه به عنوان رطوبت حدواسط مورد بررسی قرار گرفت.

آماده‌سازی دامنه‌ها

پس از تعیین شیب دامنه‌ها، ابتدا زمین به وسیله گاواهن برگردان‌دار شخم زده شد. برای ایجاد فارو (جوی و پشته)، از ردیف‌کار غلات (بدون بذر) استفاده و پشته-هایی به ارتفاع ۵ سانتی‌متر و فاصله ۲۵ سانتی‌متر از یکدیگر ایجاد شد. نوارهای کشت ایجاد شده به موازات شیب، رفتاری شبیه شیارها دارند؛ به طوری که هنگام بارندگی، جریان آب در آن‌ها تمرکز یافته، منجر به فرسایش شدید در شیارها می‌شود. بر اساس حداکثر طول یکنواخت در دامنه‌ها، طول ۶ متر برای کرت‌ها

مقیاس محدود و در شرایط آزمایشگاهی بوده است. طبیعتاً در شرایط آزمایشگاهی، بررسی نقش رطوبت اولیه خاک بر فرسایش شیاری، کاری آسان است اما در شرایط صحرایی و در وضعیت طبیعی خاک، انجام این کار با دشواری‌های زیادی روبرو است، به طوری که در اغلب موارد هم‌زمان با تغییر درجه شیب زمین، ویژگی-های خاک نیز دچار تغییر می‌شوند. به هر حال با وجود چنین برهمکنش‌هایی در پژوهش‌های صحرایی، داده‌های آن با شرایط طبیعی سازگاری بیشتری دارد. تاکنون مطالعه‌ای دقیق در مورد اثر رطوبت اولیه خاک بر رواناب و فرسایش شیاری در دامنه‌های با شیب مختلف انجام نگرفته است. بنابراین این پژوهش برای بررسی نقش محتوای رطوبتی اولیه خاک در دامنه‌های با شیب متفاوت بر رواناب و فرسایش شیاری انجام گرفت.

مواد و روش‌ها

طراحی آزمایش

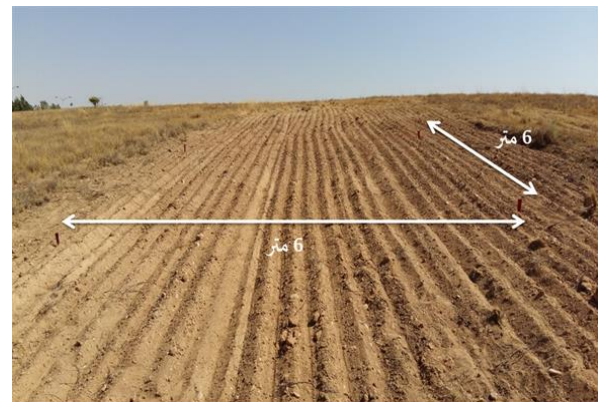
این پژوهش در پنج دامنه شیب‌دار با چهار سطح رطوبتی خاک شامل هواخشک (AD)، بین هواخشک و ظرفیت مزرعه (AD-FC)، ظرفیت مزرعه (FC) و رطوبت حد اشباع (SP) در سه تکرار انجام گرفت. این سطوح رطوبتی در شرایط طبیعی خاک در دامنه‌ها قابل مشاهده است؛ به طوری که در فصول پرباران مانند اوایل بهار، هم‌زمان با وقوع بارندگی‌های شدید، خاک سطحی دامنه‌ها به رطوبت اشباع می‌رسد و پس از چند روز، رطوبت خاک به شرایط ظرفیت مزرعه کاهش می‌یابد. با قطع بارندگی‌های فصلی و گرم شدن هوا رطوبت خاک کم شده، نهایتاً به کم‌ترین مقدار خود (هواخشک) تنزل می‌یابد. شیب دامنه‌ها به وسیله شیلنگ تراز تعیین شد و پنج دامنه یکنواخت با شیب‌های ۶/۱، ۱۰/۶، ۱۴/۸، ۲۰/۷ و ۲۷/۱ درصد، در اراضی تحقیقاتی دانشگاه زنجان انتخاب شدند. دامنه‌ها در مختصات جغرافیایی بین ۳۶° ۴۱' ۲۷" تا ۳۶° ۴۱' ۲۷" عرض شمالی و ۴۸° ۲۳' ۴۱" تا ۴۸° ۲۳' ۴۹" طول شرقی واقع بودند. اساس انتخاب

(۰/۲۵ متر × ۶ متر) در زمان ۱ ساعت می‌تواند به اندازه ۱۲۰ لیتر آب در سطح شیپار تأمین کند. چنین حجمی از آب از طریق مخزن، با دبی ۲ لیتر بر دقیقه به مدت ۱ ساعت قابل تأمین نیز می‌باشد. بررسی‌های اولیه نیز نشان داد که دبی‌های پایین‌تر (کم‌تر از ۲ لیتر بر دقیقه)، توان جداسازی ذرات از بستر را ندارد. برای دستیابی به دبی مورد نظر، شیر گازی در خروجی مخزن تعبیه شد و دبی آن با سعی و خطا طوری تنظیم شد که آب خروجی از مخزن در زمان ۱۰ دقیقه بتواند ظرف ۲۰ لیتری را پر کند. آزمایش‌ها، ابتدا با اعمال جریان آب به داخل شیپارها در شرایط هواخشک (AD) آغاز شد. سپس شیپارهای دیگر تا حد اشباع مرطوب شدند. برای این منظور، موانعی در فاصله ۵۰ سانتی‌متر در طول شیپار گذاشته و آبیاری ثقلی برای هر بخش انجام گرفت. پس از رسیدن رطوبت خاک به حد اشباع، آزمایش برای شرایط رطوبتی اشباع (SP) انجام گرفت. در شیپارهایی که رطوبت خاک به حد ظرفیت مزرعه (FC) و در شیپارهای دیگری که به حد رطوبت بین ظرفیت مزرعه و هواخشک (AD-FC) بود، آزمایش‌ها در روزهای بعد ادامه پیدا کرد. برای تعیین رطوبت پیشین خاک در لحظه شروع آزمایش از گوشه شیپار، نمونه‌برداری انجام شد. دبی رواناب بر اساس حجم آب خروجی از شیپار در واحد زمان به دست آمد (شکل ۲). در فواصل زمانی ۵ دقیقه نمونه رواناب و رسوب تا زمان ۶۰ دقیقه جمع‌آوری شد و مقدار هدررفت خاک از آن رابطه زیر به دست آمد:

$$D_r = \frac{M_s}{A \times t} \quad [1]$$

که در آن: D_r : شدت هدررفت خاک ($g \cdot m^{-2} \cdot sec^{-1}$)، M_s : جرم رسوب (g)، A : سطح شیپار (m^2) و t : زمان (sec) است.

انتخاب شد (شکل ۱). طبیعتاً در چنین طولی از شیپار، جریان متمرکز آب، توان کندن و جداسازی ذرات از بستر و وقوع فرسایش شیپاری را دارد. در مطالعات پیشین، پژوهشگران از کرت‌های با طول‌های متفاوت از کمتر (از ۵ متر تا بیش‌تر از ۲۰ متر) استفاده کرده‌اند (پولیاکوف و نیرینگ ۲۰۰۳، رجمان و برودوسکی ۲۰۰۵، مارکیوس و همکاران ۲۰۰۷). در هر دامنه تعداد ۲۴ قطعه شیپار برای بررسی تأثیر چهار سطح رطوبتی در سه تکرار ایجاد شد. شیپارها به‌طور یک در میان برای رفع اثر حاشیه‌ای مورد آزمایش قرار گرفتند.



شکل ۱- نمایی از دامنه و محدوده تحت آزمایش با شیب یکنواخت تحت شخم به موازات شیب.

پیاده سازی طرح آزمایش

آزمایش با اعمال دبی ثابت ۲ لیتر بر دقیقه در سه تکرار و با مجموع ۶۰ واحد آزمایشی در قالب طرح کاملاً تصادفی انجام گرفت. دبی جریان بر اساس شدیدترین باران‌های منطقه (۸۰ میلی‌متر بر ساعت)، انتخاب شد. داده‌های بارندگی منطقه برای دوره آماری ۱۰ سال (۱۳۸۰ تا ۱۳۹۰) تحلیل شد (بشارت و واعظی ۲۰۱۵). فراوانی وقوع چنین باران‌هایی کمتر از ۱۰ درصد است. با این وجود وقوع این باران‌ها در اوایل بهار زمانی که پوشش گیاهی سطح خاک ناچیز است، منجر به فرسایش و تشکیل شیپار در دامنه‌های منطقه می‌شود. چنین بارانی در سطح شیپار مورد بررسی



(ب)



(الف)

شکل ۲- نمایی از مخزن آب و انجام آزمایش در دامنه با شیب ۱۴/۸ درصد در رطوبت هواخشک (الف) و رطوبت ظرفیت مزرعه (ب).

نتایج و بحث

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک دامنه‌ها

با توجه به مقادیر شن، سیلت و رس، خاک دامنه‌های با شیب ۶/۱، ۱۰/۶، ۱۴/۸، ۲۰/۷ درصد دارای بافت لوم شنی و دامنه با شیب ۲۷/۱ درصد دارای بافت شن لومی بود. خاک‌ها مقادیر زیادی بخش سنگی (بالای ۲۰ درصد) دارند (جدول ۱) که بیانگر بافت درشت‌دانه و سنگی دامنه‌هاست. درشت بودن بافت دامنه‌ها و مقادیر زیاد بخش سنگی دلیلی برای بالا بودن چگالی ظاهری خاک تا حد ۱/۵۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب بود. از سوی دیگر خاک دامنه‌ها اغلب به سبب داشتن مقادیر کم از ذرات پیونددهنده مانند رس (کمتر از ۱۶/۲۵ درصد)، دارای خاک‌دانه‌های کوچکتر و ناپایدار بودند. اهمیت ذرات رس در پایداری خاک‌دانه در پژوهش‌های پیشین بیان شده است (کامانو و همکاران ۲۰۰۹). خاک‌ها از نظر نفوذپذیری محدودیتی ندارند. نفوذپذیری بالا و همچنین بافت درشت‌دانه می‌تواند منجر به کاهش حساسیت خاک دامنه‌ها به فرسایش آبی شود. وجود شیب زیاد به دلیل کاهش فرصت نفوذ آب به خاک می‌تواند مهم‌ترین عامل هدررفت آب و خاک از دامنه‌ها باشد.

تعیین ویژگی‌های خاک دامنه‌ها

نمونه‌های از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متر از سه نقطه شیار برداشت شد. توزیع نسبی اندازه ذرات به روش هیدرومتر (جی و باو در ۱۹۸۶)، درصد سنگریزه (قطر ۲ تا ۸ میلی‌متر) و سنگ (بزرگتر از ۸ میلی‌متر) به روش وزنی، چگالی ظاهری به روش سیلندر (بلیک و هارج ۱۹۸۶)، هدایت هیدرولیکی از روش درجای تک حلقه نفوذ (رابیو و همکاران ۱۹۹۷)، پایداری خاک‌دانه بر اساس میانگین وزنی قطر خاک‌دانه‌های پایدار در آب به روش الک تر (کمپر و روزنا ۱۹۸۶) در زمان یک دقیقه (حسن‌زاده و همکاران ۲۰۱۳) تعیین شدند.

تجزیه و تحلیل داده‌ها

برای بررسی تأثیر رطوبت خاک بر رواناب و هدررفت خاک از شیارها از روش تجزیه واریانس آزمون دانکن استفاده شد. برای رسم نمودار داده‌های حاصل از انجام آزمایش از نرم افزار Excel نسخه ۲۰۱۳ و جهت تحلیل داده‌ها از نرم افزار SPSS نسخه ۲۲ استفاده شد. قبل از هر گونه آنالیز آماری، نرمال بودن توزیع داده‌ها با استفاده از آزمون شاپیرو-ویلک (شاپیرو و ویلک ۱۹۶۵) بررسی شد و در صورت لزوم از تبدیل مناسب برای نرمال کردن داده‌ها استفاده شد.

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی خاک دامنه‌های مورد بررسی.

شیب دامنه (%)	شن (%)	سیلت (%)	رس (%)	بخش سنگی (%)	چگالی ظاهری (g cm ⁻³)	پایداری خاک‌دانه در آب (mm)	هدایت هیدرولیکی اشباع (cm h ⁻¹)
۶/۱	۵۸/۵۵	۲۸/۹۵	۱۲/۵۰	۲۲/۰۸	۱/۲۷	۰/۳۲	۲۲/۶۰
۱۰/۶	۵۵/۷۵	۲۸/۰۰	۱۶/۲۵	۴۰/۲۹	۱/۳۱	۰/۲۷	۱۸/۵۰
۱۴/۸	۵۵/۸۲	۲۷/۹۲	۱۶/۲۵	۴۰/۵۵	۱/۴۴	۰/۳۶	۱۷/۲۰
۲۰/۷	۵۹/۱۰	۲۵/۹۰	۱۵/۰۰	۵۳/۵۴	۱/۵۵	۰/۱۷	۲۹/۹۰
۲۷/۱	۷۵/۲۶	۱۷/۲۳	۷/۵۰	۵۶/۹۳	۱/۵۰	۰/۱۸	۱۵/۴۰

($P < 0.01$) و ۲۰/۷ درصد ($P < 0.001$) قرار گرفت. با این حال تأثیر محتوای رطوبتی خاک بر فرسایش شیاری در دامنه‌های با شیب ۱۰/۶ و ۲۷/۱ درصد معنی‌دار نبود (جدول ۲). ناپایداری خاکدانه‌ها در این دو خاک یکی از عواملی است که موجب می‌شود خاکدانه‌ها در اثر جذب آب دچار وارفتگی شده، مقاومت ذرات خاک در برابر تنش برشی جریان کمتر باشد و عملاً تفاوتی از نظر فرسایش شیاری بین سطوح رطوبتی مشاهده نشود.

رابطه بین فرسایش شیاری و رطوبت اولیه خاک

الگوی تغییرات مقدار فرسایش شیاری با تغییر رطوبت خاک در دامنه‌ها متفاوت بود. روابط قوی بین مقدار فرسایش شیاری و سطح رطوبتی خاک مشاهده نشد چرا که تغییرات رطوبت خاک می‌تواند نقش سایر عوامل مؤثر بر مقاومت خاک مانند پایداری ساختمان و عوامل مؤثر بر تنش برشی جریان (شدت نفوذ آب به خاک) را تحت تأثیر قرار دهد. در دامنه‌های با شیب ۶/۱، ۱۴/۸ و ۲۰/۷ درصد برخلاف سایر دامنه‌ها، با افزایش رطوبت خاک، فرسایش شیاری روند کاهشی داشت (شکل ۳) که برخلاف مطالعاتی است که در آن‌ها نشان دادند که افزایش رطوبت پیشین خاک به‌طور معنی‌داری

تغییرات هدررفت خاک تحت تأثیر محتوای رطوبتی خاک

مقدار فرسایش شیاری در رطوبت هواخشک، بین هواخشک و ظرفیت مزرعه، ظرفیت مزرعه و اشباع در دامنه با شیب ۶/۱ درصد به‌ترتیب ۰/۰۰۵، ۰/۰۰۱، ۰/۰۰۳ و ۰/۰۰۲ گرم بر مترمربع در ثانیه بود. مقدار فرسایش شیاری در دامنه با شیب ۱۴/۸ درصد در سطوح مختلف رطوبتی به‌ترتیب ۰/۳۰۶، ۰/۰۵۶، ۰/۰۷۸ و ۰/۰۵۵ گرم بر مترمربع در ثانیه بود. شدت این فرسایش در دامنه با شیب ۲۰/۷ درصد در سطوح رطوبتی مذکور به‌ترتیب ۰/۰۰۴۵، ۰/۰۰۰۶، ۰/۰۰۰۶ و ۰/۰۰۲ گرم بر مترمربع در ثانیه بود. مقدار فرسایش شیاری در دامنه‌ها به‌دلیل وجود بافت درشت و سنگریزه‌ای کم بود (شکل ۲). تغییرات زیادی در فرسایش شیاری در دامنه‌ها وجود داشت و توزیع آماری آن از الگوی نرمال پیروی نکرد. تبدیل داده‌ها با استفاده از توابع رایج مانند لگاریتم، توان و غیره نیز در تغییر الگوی پراکنش داده‌ها به الگوی نرمال مؤثر نبود. براساس تجزیه واریانس روی داده‌های اصلی، فرسایش شیاری تحت تأثیر سطوح مختلف رطوبت خاک در دامنه‌های با شیب ۶/۱ درصد ($P < 0.01$)، ۱۴/۸ درصد

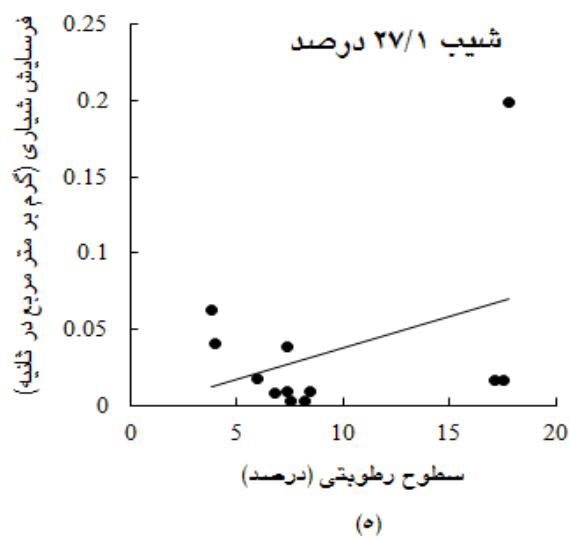
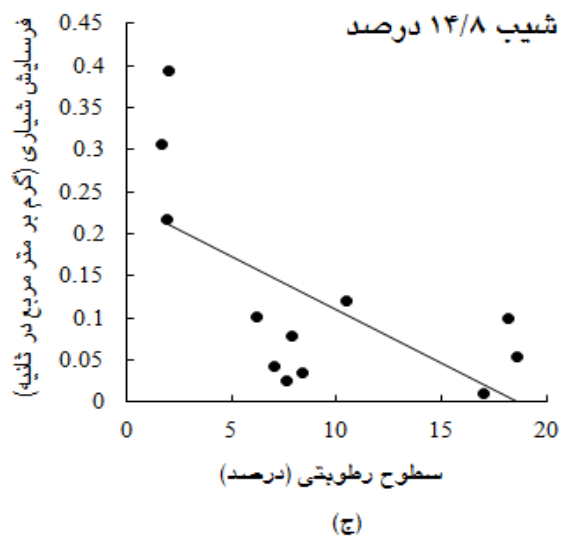
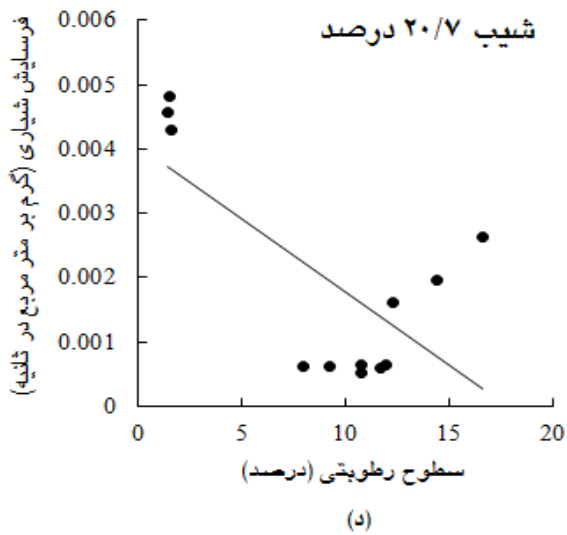
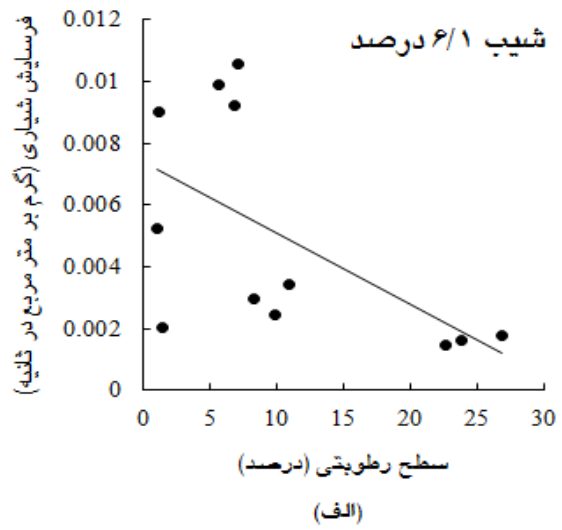
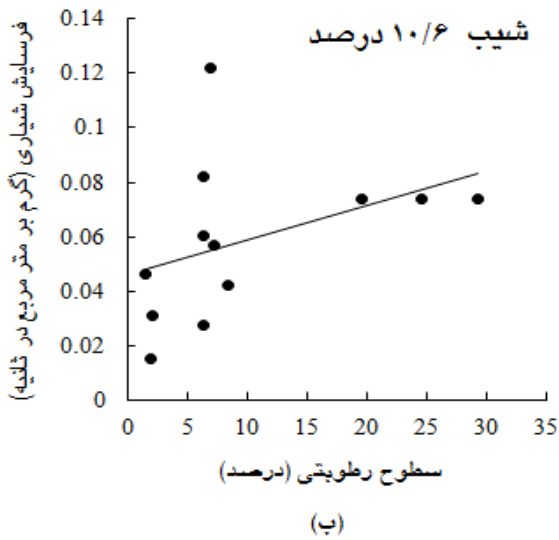
مختلف رطوبت، تغییر محسوسی در مقدار فرسایش شیاری مشاهده نشد. بررسی‌ها نشان می‌دهد وجود ذرات ریز مانند سیلت در خاک موجب می‌شود فرسایش پذیری خاک افزایش یابد (حسن‌زاده و همکاران ۲۰۱۳).

تغییرات رواناب تحت تأثیر محتوای رطوبتی خاک

مقدار رواناب در رطوبت هواخشک، بین ظرفیت مزرعه و هواخشک، ظرفیت مزرعه و اشباع در دامنه با شیب ۶/۱ درصد به‌طور میانگین به‌ترتیب ۴/۹۶، ۱۰/۱، ۱۲/۴ و ۲/۸۴ سانتی‌مترمکعب بر ثانیه بود. مقدار رواناب در دامنه با شیب ۱۴/۸ درصد در سطوح مختلف رطوبتی به‌ترتیب ۱۸/۲، ۹/۸۷، ۷/۷۷ و ۵/۴۲ سانتی-مترمکعب بر ثانیه بود. مقدار رواناب در دامنه با شیب ۲۰/۷ درصد در سطوح مختلف رطوبتی به‌ترتیب ۷/۸۲، ۳/۲۳، ۴/۵۰ و ۶/۴۰ سانتی‌مترمکعب بر ثانیه بود (شکل ۴). در تمام دامنه‌های مورد بررسی به جز دامنه با شیب ۲۷/۱ درصد، با افزایش محتوای رطوبتی خاک، تولید رواناب از الگوی کاهشی پیروی کرد. در دامنه با شیب ۲۷/۱ درصد، تغییرات تولید رواناب با افزایش محتوای رطوبتی خاک بسیار کمتر از سایر دامنه‌ها بود. وجود مقدار شن (۷۵ درصد) و بخش سنگی (نزدیک ۵۷ درصد) در این دامنه عامل مهم کاهش تولید رواناب بود. با توجه به تغییرات زیاد تولید رواناب در دامنه‌ها، داده‌های رواناب از الگوی نرمال پیروی نکرد. تجزیه واریانس تغییرات مقدار رواناب در سطوح رطوبتی مختلف و در دامنه‌های با شیب متفاوت نشان داد که رطوبت خاک اثر معنی‌داری بر مقدار رواناب در شیاری، در تمام دامنه‌ها داشت (جدول ۲).

پایداری خاک‌دانه و نفوذپذیری را کاهش و رواناب و جداسدن ذرات را افزایش می‌دهد (وانگ‌من و همکاران ۲۰۰۰). مطالعات دیگر نشان داده‌اند که افزایش رطوبت پیشین به‌طور معنی‌داری رواناب، جدا شدن ذرات و فرسایش بین‌شیاری را کاهش می‌دهد (لدو و همکاران ۲۰۰۴). دفرشا و ملس (۲۰۱۲) با بررسی تأثیر شدت بارندگی بر فرسایش پاشمانی نشان دادند که در خاک مرطوب، غلظت رسوب به‌صورت خطی و تا یک سوم نسبت به حالت خشک کاهش می‌یابد. لیو و همکاران (۲۰۱۱) نشان دادند که هرچه رطوبت خاک افزایش یابد، انبساط غیریکنواخت ذرات و تخریب ساختمان کم‌تر شده، تشکیل سله و فرسایش خاک کاهش می‌یابد.

در دامنه‌های با شیب ۶/۱، ۱۴/۸ و ۲۰/۷ درصد با افزایش محتوای رطوبتی خاک، چسبندگی ذرات به یکدیگر و پایداری توده خاک افزایش یافت و به‌دنبال آن مقدار فرسایش شیاری کاهش یافت. از سوی دیگر، بالا بودن مقادیر بخش سنگی دامنه‌ها نیز سبب کاهش مقدار فرسایش شیاری شد. محققان نیز بر این باورند که در صورت وجود پوشش سنگریزه‌ای در سطح خاک، فرسایش کاهش می‌یابد (ریک-زاپ و همکاران ۲۰۰۷). این نتیجه برخلاف پژوهش‌هایی است که بیان نمودند با افزایش رطوبت پیشین خاک، تولید رواناب افزایش و در نتیجه فرسایش خاک بیش‌تر می‌شود (وهایی و نیکامی ۲۰۰۸). عدم وجود تغییرات بارز در فرسایش شیاری با تغییر محتوای رطوبتی خاک در دامنه با شیب ۲۷/۱ درصد، وجود بیش از حد مقدار شن (۷۵ درصد) و بخش سنگی (نزدیک ۵۷ درصد) بود (شکل ۳). در این دامنه عملاً مقادیر ذراتی مانند سیلت و رس که بتوانند فرسایش یابند، بسیار کم بود و با وجود اعمال سطوح



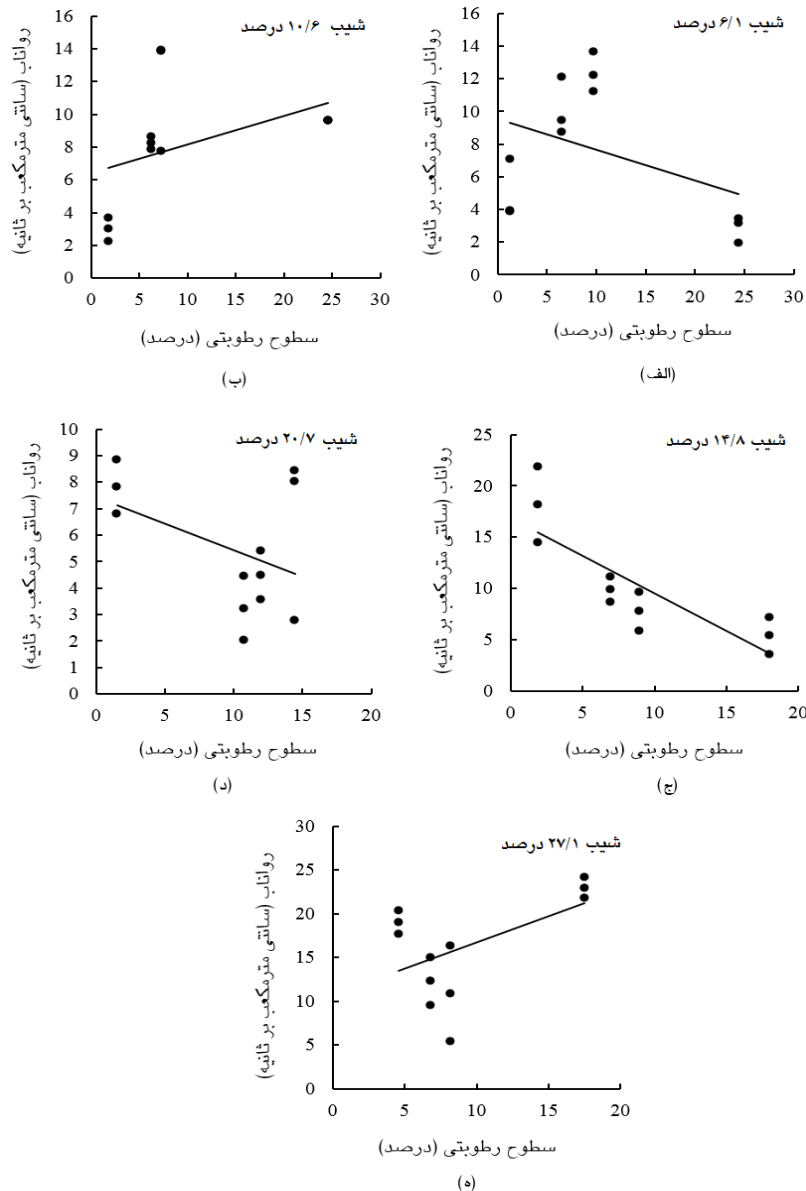
شکل ۳- تغییرات فرسایش شیبی تحت تأثیر تغییرات محتوای رطوبتی اولیه خاک در دامنه‌های با شیب ۶/۱ درصد (الف)،

۱۰/۶ درصد (ب)، ۱۴/۸ درصد (ج)، ۲۰/۷ درصد (د) و ۲۷/۱ درصد (ه).

جدول ۲- تجزیه واریانس رواناب و هدررفت خاک از شیپارها با افزایش سطوح رطوبت و در دامنه‌های با شیب متفاوت.

هدررفت خاک از شیپارها		رواناب	
میانگین مربعات	متغیر	میانگین مربعات (10^{-11} عدد)	متغیر
4×10^{-10} **	در دامنه با شیب ۶/۱ درصد	۵/۸۶ ***	در دامنه با شیب ۶/۱ درصد
0.002 ns	در دامنه با شیب ۱۰/۶ درصد	۴/۲۶ **	در دامنه با شیب ۱۰/۶ درصد
0.045 **	در دامنه با شیب ۱۴/۷ درصد	۹/۲۰ ***	در دامنه با شیب ۱۴/۷ درصد
1×10^{-10} ***	در دامنه با شیب ۲۰/۷ درصد	۱/۲۴ *	در دامنه با شیب ۲۰/۷ درصد
0.003 ns	در دامنه با شیب ۲۷/۱ درصد	۹/۷۴ **	در دامنه با شیب ۲۷/۱ درصد

***، **، * و ns به ترتیب معنی‌دار در سطح ۰/۰۰۱، ۰/۰۱، ۰/۰۵ و غیر معنی‌دار



شکل ۴- تغییرات رواناب تحت تأثیر تغییر محتوای رطوبتی اولیه خاک در دامنه‌های با شیب ۶/۱ درصد (الف)، ۱۰/۶ درصد (ب)، ۱۴/۸ درصد (ج)، ۲۰/۷ درصد (د) و ۲۷/۱ درصد (ه).

نشان دادند که درصد رطوبت خاک همبستگی معنی‌دار مثبتی با رواناب دارد.

نتیجه‌گیری کلی

مقدار هدررفت خاک از شیارها در دامنه‌ها به- دلیل فراوانی زیاد ذرات درشت‌دانه بسیار کم بود. تنها در دامنه‌های با شیب ۶/۱، ۸/۱۴ و ۷/۲۰ درصد اثر مقدار رطوبت خاک بر هدررفت خاک از شیارها معنی- دار بود. برخلاف اغلب یافته‌های پیشین، با افزایش محتوای رطوبتی خاک در دامنه‌ها، رواناب و هدررفت خاک از شیارها کاهش یافت. با افزایش محتوای آب خاک، از یک سو چسبندگی توده خاک و پایداری آن افزایش یافت و از سوی دیگر بخش عمده جریان آب به‌صورت زیرسطحی رخ داد. تشکیل چنین جریان‌هایی سبب کاهش مقدار رواناب سطحی شد و در نتیجه مقدار انتقال ذرات در دامنه‌ها توسط جریان درون شیار کمتر شد. نتایج نیز نشان داد که در این دامنه‌ها (۸/۱۴ و ۷/۲۰ درصد)، همبستگی مثبت معنی‌دار بین هدررفت خاک از شیارها و رواناب وجود داشت. به‌طور کلی این پژوهش نشان داد که در دامنه‌های با بافت درشت، مقدار هدررفت خاک از شیارها اندک است و افزایش رطوبت خاک به‌جای افزایش رواناب سطحی، منجر به تقویت جریان زیرسطحی می‌شود. کاهش رواناب سطحی نیز منجر به کاهش هدررفت خاک از شیارها می‌شود. در خاک‌های درشت‌بافت و سنگی، تأثیر رطوبت خاک بر رواناب و هدررفت خاک از شیارها از روند یکسانی پیروی نمی‌کند. برخلاف خاک‌های ریزبافت، در خاک- های درشت‌بافت به‌دلیل نفوذپذیری زیاد و وجود مانع بیش‌تر در برابر جریان، پیچیدگی روابط بین رطوبت خاک، تولید جریان و هدررفت خاک از شیارها زیاد است.

همبستگی بین هدررفت خاک از شیارها، رواناب و محتوای رطوبتی خاک

نتایج نشان داد که تنها در دامنه‌های با شیب ۸/۱۴ و ۷/۲۰ درصد، همبستگی معنی‌دار بین هدررفت خاک از شیارها و رواناب برقرار است (جدول ۳). همبستگی منفی بین آن دو متغیر به دلیل وجود بافت درشت خاک و بخش سنگی زیاد بود. در این شرایط بخش عمده جریان آب در رطوبت‌های بالا به‌صورت جریان زیرسطحی اتفاق می‌افتد و بخش اندکی به- صورت جریان سطحی رخ می‌دهد. نشانه‌های حرکت زیرسطحی آب از خیس شدن خاک دیواره چاله‌های انتهایی شیار قابل مشاهده بود. از آن‌جا که انتقال ذرات در فرسایش شیار توسط جریان‌های متمرکز آب درون شیار رخ می‌دهد، پس مقدار فرسایش شیار در رطوبت‌های بالا کاهش پیدا می‌کند.

جدول ۳- مقادیر همبستگی بین هدررفت خاک از شیارها و رواناب در دامنه‌های با شیب متفاوت.

همبستگی بین هدررفت خاک از شیارها و رواناب	دامنه
۰/۳۷	شیب ۶/۱
۰/۴۳	شیب ۱۰/۶
۰/۹۰**	شیب ۱۴/۸
۰/۶۵*	شیب ۲۰/۷
۰/۴۳	شیب ۲۷/۱

** و * به ترتیب همبستگی معنی‌دار در سطح ۰/۰۱ و ۰/۰۵.

همبستگی منفی بین رطوبت پیشین خاک با رواناب با یافته‌های کاستیلو و همکاران (۲۰۰۳) در رابطه با نقش رطوبت اولیه در پاسخ رواناب در منطقه نیمه‌خشک و نتایج وهابی و مهدیان (۲۰۰۸) بر روی تأثیر رطوبت اولیه خاک بر مقدار رواناب تحت باران شبیه‌سازی شده مغایرت دارد. آزموده و همکاران (۲۰۱۰) نیز با مقایسه رواناب و فرسایش در خاک‌های تحت پوشش کاربری‌ها

منابع مورد استفاده

- Abbasi M, Najafineja A, Berdi Sheikh V and Azim Mohseni M, 2017. Investigating land use and slope effects on soil properties, runoff and sediment using rainfall simulator case study of Kechik watershed in Golestan province. *Journal of Environmental Erosion Research* 4(24):104-124.
- Arsham A, Akhond Ali AM and Behnia AK. 2009. Study on effects of soil antecedent moisture content in runoff and sediment using rainfall simulator. *Desert and Rangeland Research Journal* 16: 445-455 (In Persian with English abstract)
- Azmoodeh A, Kaviani A, Soleimani K and Vahabzadeh Gh. 2010. Comparing runoff and soil erosion in forest, dry farming and garden land uses soils using rainfall simulator. *Journal of Water and Soil* 24(3): 490-500. (In Persian with English abstract)
- Behdari M and Vaezi AR, 2018. Effect of initial soil moisture on runoff generation and soil loss in different soil textures under simulated rainfall condition. *Iran-Watershed Management Science and Engineering* 11(39):11-21. (In Persian with English abstract)
- Besharat F and Vaezi AR, 2015. Effect of temporal distribution pattern of rainfall during events on runoff and soil loss under simulated rainfalls. *Iran-Watershed Management Science and Engineering* 9(29):9-18. (In Persian with English abstract)
- Blake GR and Hartge KH, 1986. Bulk density Methods of Soil Analysis: Part, 1, pp. 363-375.
- Castillo VM, 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* 284:114-130.
- Defersha MB and Melesse AM, 2012. Effect of rainfall intensity, slope and antecedent moisture content on sediment concentration and sediment enrichment ratio. *Catena* 90: 4752.
- Gandolfo C and Savi F, 2000. A mathematical model for the coupled simulation of surface runoff and infiltration. *Journal of Agriculture Engineering Resource* 75:49-55.
- Gee GW and Bauder JW, 1986. Particle-size analysis. Pp. 383-411. In: Klute A (ed). *Methods of soil analysis: Part 1. Physical and Mineralogical Methods*. The American Society of Agronomy. Madison, Wisconsin.
- Guo T, Wang Q, Li D and Zhuang J, 2010. Effect of surface stone cover on sediment and solute transport on the slope of fallow land in the semiarid loess region of northwestern China. *Journal of Soils and Sediments* 10:1200-1208.
- Hardie M, Lisson S, Doyle R and Cotching W, 2013. Determining the frequency, depth and velocity of preferential flow by high frequency soil moisture monitoring. *Journal of Contaminant Hydrology* 144:66-77.
- Hasanzadeh H, Vaezi AR and Mohammadi MH, 2013. Runoff variations of different soils in plot scale under the same simulated rainfalls. *Iranian Journal of Soil Water Research* 44(3): 245-254. (In Persian with English abstract)
- Hlavacikova H, Novak V and Holko L, 2015. On the role of rock fragments and initial soil water content in the potential subsurface runoff formation. *Journal of Hydrology and Hydromechanics* 63(1):71-81.
- Kaewmano C, Kheoruenromne I, Suddhiprakarn A and Gilkes RJ, 2009. Aggregate stability of salt-affected kaolinitic soils on the North-east Plateau, Thailand. *Soil Research* 47(7):697-706.
- Kemper DW and Rosenau RC, 1986. Aggregate stability and aggregate and aggregate size distribution. Pp. 425-442. In: Klute A. (ed). *Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical Properties*. The American Society of Agronomy. Madison, Wisconsin.
- Kaviani A, Azmoodeh 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* 36(1): 89-104. (In Persian with English abstract)
- Lado M, Ben-Hur M and Shainberg I, 2004. Soil wetting and texture effects on aggregate stability, seal formation, and erosion *Soil Science Society of America Journal* 68:1992-1999.
- Li J, Cai Q and Sun L, 2010. Reviewing on factors and threshold conditions of rill erosion. *Progress in Geography* 29(11):1319-1325.
- Li M, Li ZB, Ding WF, Liu PL and Yao WY, 2006. Using rare earth element tracers and neutron activation analysis to study rill erosion process. *Applied Radiation and Isotopes* 64(3):402-408.

- Liu H, Lei TW, Zhao J, Yuan CP, Fan YT and Qu LQ, 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.
- Marques MJ, Bienes R, Jimenes L and Perez-Rodrigues R, 2007. Effect of vegetal cover on runoff and soil erosion under light intensity events, rainfall simulation over USLE plots. *Science of the Total Environment* 378:161-165.
- Morgan, RPC, 2005. *Soil Erosion and Conservation*. National Soil Resources Institute, Cranfield University (Third Ed.) Blackwell Publishing Ltd.
- Opsomer JD, Botts C and Kim JY, 2003. Small area estimation in a watershed erosion assessment survey. *Journal of Agricultural, Biological, and Environmental Statistics* 8(2):139-152.
- Polyakov VO and Nearing MA, 2003. Sediment transport in rill flow under deposition and detachment conditions. *Catena* 51:33-43.
- Rejman J and Brodowski R, 2005. Rill characteristics and sediment transport as a function of slope length during a storm event on loess soil. *Earth Surface Process and Landforms* 30:231-239.
- Rieke-Zapp D, Poesen J and Nearing MA, 2007. Effects of rock fragments incorporated in the soil matrix on concentrated flow hydraulics and erosion. *Earth Surface Processes and Landforms* 32:1063-1076.
- Romero CC, Stroosnijder L and Guillermo AB, 2007. Interrill and rill erodibility in the northern Andean Highlands. *Catena* 70:105-113.
- Rubio JL, 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(1):67-78.
- Sadeghi SHR, Zarif Moazzam MS and Mirnya SKH, 2014. Time variations of hydrological processes of small experimental plots in a forest watershed. *Water and Soil Conservation Research* 21(6):207-222. (In Persian with English abstract)
- Shapiro SS and Wilk MB, 1965. An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika* 52 (3-4):591-611.
- Truman CC, Potter TL, Nuti RC, Franklin DH and Bosch DD, 2011. Antecedent water content effects on runoff and sediment yields from two coastal plain ultisols. *Agricultural Water Management* 98:1189-1196.
- Vahabi J and Mahdian MH, 2008. Rainfall simulation for the study of the effects of efficient factors on runoff rate. *Current Science* 95:1439-1445.
- Vahabi J and Nikkami D, 2008. Assessing dominant factors affecting soil erosion using a portable rainfall simulator. *International Journal of Sediment Research* 23:375-385.
- Wangemann SG, Kohl RA and Molumeli PA, 2000. Infiltration and percolation influenced by antecedent soil water content and air entrapment. *Transactions of the American Society of Association Executives* 43:1517-1523.
- 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.
- Wirtz S, Seeger M and Ries JB, 2012. Field experiments for understanding and quantification of rill erosion processes. *Catena* 91(1):21-34.
- Zarinabadi E and Vaezi AR. 2016. Runoff production and soil loss in pasture with poor coverage and affected by land use change and plow direction. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 47(1):87-98. (In Persian with English abstract)
- Zhou W and Wu B, 2008. Assessment of soil erosion and sediment delivery ratio using remote sensing and GIS: a case study of upstream Chaobaihe River catchment, north China. *International Journal of Sediment Research* 23(2):167-173.
- Zhang Y, Liu J, Xu X, Tian Y, Li Y and Gao Q, 2010. The response of soil moisture content to rainfall events in semi-arid area of Inner Mongolia. *Procedia Environmental Sciences* 2:1970-1978.
- Ziadat FM and Taimeh AY, 2013. Effect of rainfall intensity, slope, land use and antecedent soil moisture on soil erosion in an arid environment. *Land Degradation and Development* 24(6):582-590.