

تأثیر آب‌گریزی خاک بر رواناب و فرسایش در شدت‌های مختلف بارش

ریحانه‌السادات موسوی‌زاده مجرد^{۱*}، سید حسن طباطبائی^۲، بهزاد قربانی^۳ و نگار نورمهنداد^۴

چکیده

ویژگی‌های فیزیکی خاک نقش مهمی در تولید رواناب، فرسایش پذیری و رسوب دارند. هدف این پژوهش بررسی میزان رواناب و فرسایش در سطوح مختلف آب‌گریزی و شدت بارش است. بدین منظور خاک به‌طور مصنوعی با استفاده از اسید استئاریک، آب‌گریز شد. سپس با استفاده از مدل فیزیکی به نام دستگاه تحقیقاتی پیشرفته مطالعات هیدرولوژی، مقدار رسوب و رواناب پنج تیمار خاک آب‌گریز شده تحت تأثیر پنج تیمار شدت بارش، شبیه‌سازی شد. تیمارهای شدت بارش شامل پنج سطح احتمال وقوع صفر (احتمال وقوع حتمی)، ۱۰٪ ± و ۲۰٪ ± شدت بارش ۳۰ دقیقه‌ای با دوره بازگشت ۱۰۰۰ سال ایستگاه باران نگار شهرکرد (۱/۴۱ میلی‌متر در دقیقه) بوده است. نتایج نشان داد که با افزایش سطح آب‌گریزی حجم رواناب خارج شده از سیستم افزایش یافت. ضریب رواناب در تیمار خاک آبدوست ۰/۰۰۰۸ تا ۰/۰۰۱۱ و در تیمارهای آب‌گریز ۰/۰۵ تا ۰/۹۴ مشاهده شد. مقدار رسوبات خارج شده به همراه رواناب، با افزایش سطح آب‌گریزی کاهش یافت. در تیمارهای خاک آب‌گریز حجم نفوذ عمقی در دو سطح آب‌گریزی اندک و متوسط در مقایسه با نفوذ عمقی تیمار شاهد، به میزان اندک (۳۸۰ تا ۹۵۰ سانتی‌متر مکعب) مشاهده شد. در تیمارهای آب‌گریزی شدید و خیلی شدید، هیچ مقدار نفوذ عمقی مشاهده نشد.

واژه‌های کلیدی: آب دوست، آزمون نفوذ قطره آب، اسید استئاریک، زاویه تماس، مدل فیزیکی.

ارجاع: موسوی‌زاده مجرد ر.، طباطبائی س. ح.، قربانی ب. و نورمهنداد ن. ۱۳۹۹. تأثیر آب‌گریزی خاک بر رواناب و فرسایش در شدت‌های مختلف بارش. مجله پژوهش آب ایران. ۳۷: ۵۱-۶۰.

۱- دانش‌آموخته دکتری مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

۳- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

۴- استادیار دانشگاه پیام‌نور اصفهان، اصفهان.

* نویسنده مسئول: rey.mousavil@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۵/۲۰

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۱/۲۴

مقدمه

فرآیند بارش- رواناب و فرسایش خاک بسیار پیچیده و کنترل آن مستلزم شناخت عوامل مؤثر در ایجاد آن‌هاست (آقاسی، ۱۹۹۶). عوامل زیادی بر رواناب و فرسایش تأثیرگذار است؛ اما ویژگی‌های بارش و ویژگی‌های خاک دو عامل اصلی مؤثر بر تولید رواناب و فرسایش خاک هستند (ران و همکاران، ۲۰۱۲).

در بین ویژگی‌های بارش، شدت و مدت بارش دو عامل غالب هستند که پاسخ هیدرولوژیکی را کنترل می‌کنند (ران و همکاران، ۲۰۱۲). بارش‌هایی با شدت بالا و مدت طولانی‌تر معمولاً رواناب زودتر و پیک رواناب بالاتر را تولید می‌کنند (وی و همکاران، ۲۰۱۴؛ ران و همکاران، ۲۰۱۲) که منجر به رواناب بزرگ‌تر می‌شوند (دوز سانتوز و همکاران، ۲۰۱۷). بارش همچنین، از مهم‌ترین عامل‌های دینامیک مؤثر بر فرسایش خاک است. تغییرات شدت بارش، آثار اساسی بر فرسایش خاک دارند (کومو و دلاسل، ۲۰۱۳). تأثیر ویژگی‌های بارش بر فرسایش خاک به‌طور گسترده با آزمایش‌های مختلف بررسی شده است (دو لیما و همکاران، ۲۰۰۹؛ دو سیلوا و همکاران، ۲۰۱۷). بان و همکاران (۲۰۱۸) بیان کردند که با توجه به پدیده گرمایش جهانی، مطالعه شدت بارش و اثر آن بر رواناب و رسوب اهمیت بیشتری یافته است. به تازگی بارش‌های سنگین بیشتر اتفاق می‌افتند که در نتیجه آثار سهمگین‌تری نیز خواهند داشت (علوی‌نیا و همکاران، ۲۰۱۸؛ میلان، ۲۰۱۴). در این پژوهش برای در نظر گرفتن عامل فرسایشی بارش، شدت بارش سی دقیقه‌ای (I30) به‌عنوان شاخص فرسایشی باران مبتنی بر انرژی جنبشی شدت بارندگی (گرامی لوشابی و همکاران، ۱۳۹۵) که در نقاط مختلف ایران نیز شاخص مناسبی تشخیص داده شده (صادقی و همکاران، ۲۰۱۱)، در نظر گرفته شده است.

خاصیت آب‌گریزی خاک^۱ (SWR) به‌عنوان یک ویژگی خاک که بر هیدرولیک و هیدرولوژی خاک تأثیر می‌گذارد (دکر و همکاران، ۲۰۰۵؛ گائو و همکاران، ۲۰۱۸)، مطرح است. زمانی که ذرات خاک با مواد آب‌گریز پوشیده می‌شوند، نفوذ آب به شدت به تأخیر می‌افتد که در این صورت، قابلیت خسی خاک کاهش می‌یابد (مولر و همکاران، ۲۰۱۸؛ محمدی و همکاران، ۲۰۱۸). ژنگ و

همکاران (۲۰۱۷) تأثیر آب‌گریزی بر واکنش هیدرولوژیکی خاک را ارزیابی کردند. آنان نشان دادند که هرچه درجه SWR بالاتر باشد، در عمده مطالعاتی که به بررسی رابطه آب‌گریزی خاک و ایجاد رواناب پرداخته شده است، از روش‌های غیرمستقیم (تحلیل‌های آماری) استفاده شده است (فریرا و همکاران، ۲۰۱۶؛ محمدی و همکاران، ۲۰۱۸). جیاکومار و همکاران (۲۰۱۳) در نیوزلند مطالعه‌ای انجام دادند و در نتیجه آن روشی مستقیم و جدید در برآورد کمی آثار دفع آب بر رواناب و شست‌وشوی املاح ارائه کردند. در این روش، برای اندازه‌گیری مستقیم اثر دفع آب بر ایجاد رواناب، دستگاه اندازه‌گیری رواناب^۲ (ROMA) تهیه و ارائه شده است. مولر و همکاران (۲۰۱۸) شبیه‌ساز بدون وقفه پرتابل را برای بررسی اثر SWR بر رواناب و از دست رفتن مواد مغذی توسعه دادند. نتایج نشان می‌دهد که آب‌گریزی باعث تسریع تولید رواناب می‌شود. در این پژوهش، خاک مورد مطالعه با استفاده از ماده شیمیایی و به‌طور مصنوعی آب‌گریز شده است. آب‌گریزی مصنوعی با لجن فعال در مطالعات نورمهند و همکاران (۱۳۹۴) و کاربرد اسید استتاریک در آب‌گریز نمودن خاک، قبلاً در مطالعات بیرامی و همکاران (۱۳۹۴) برای بررسی آثار آب‌گریزی خاک بر مشخصات نفوذ خاک بررسی شده است. اسید استتاریک به‌صورت پودری سفید رنگ و غیرقطبی است و با فرمول $C_{18}H_{36}O_2$ معرفی می‌شود. به نقل از دنگ و دیکسون (۲۰۰۲) اسید استتاریک، یک اسید آلی است که در خاک طبیعی یافت می‌شود. هریانتو و همکاران (۲۰۰۷)، حلالیت اسید استتاریک را در چهار محلول اتانول، متانول، اتیل استات و استون بررسی کردند. حلالیت اسید استتاریک در اتیل استات بیش از سایر محلول‌ها گزارش شد؛ اما به‌دلیل دسترسی و هزینه اقتصادی در این پژوهش از استون به‌عنوان حلال استفاده شد. لی لامانیه و همکاران (۲۰۰۸) از محلول دی‌اتیل‌اتر برای انحلال اسید استتاریک استفاده کردند.

با توجه به قرارگیری ایران در اقلیم خشک و نیمه‌خشک و اهمیت بررسی پدیده‌های هیدرولوژیکی در این اقلیم، شبیه‌سازی اثر احتمالات مختلف رخداد شدت بارش در میزان حجم و ضریب رواناب و رسوب به‌طور مستقیم با استفاده از مدل فیزیکی و همچنین تأثیر این احتمالات بر

2- Run-Off Measurement Apparatus (ROMA)

1- Soil Water Repellency (SWR)

سرعت بخشد. روی شن‌ها با توری گالوانیزه پوشانده و ده سانتی‌متر خاک روی توری ریخته شد. از این ده سانتی‌متر خاک، ۵ سانت بالایی به‌عنوان خاک سطحی در نظر گرفته شد (شکل ۲).

رطوبت خاک سطحی و خاک زیر سطحی قبل از انجام آزمایش و پس از آزمایش اندازه‌گیری و ثبت شد. مدت زمان بارش، به معنای مدت کار دستگاه و پخش آب توسط آبپاش‌ها در نظر گرفته شد. بارش تا زمانی که قطرات آب به دورترین نقطه خاک برسد، انجام شد. برای ایجاد آب‌گریزی یکنواخت در خاک مورد بررسی با ویژگی‌های فیزیکی مشخص، ابتدا، خاک به‌طور مصنوعی با استفاده از اسید استتاریک، آب‌گریز شد. آب‌گریزی خاک در پنج سطح (بدون آب‌گریزی (نمونه شاهد)، آب‌گریزی جزئی، آب‌گریزی زیاد، آب‌گریزی شدید و آب‌گریزی خیلی شدید) ایجاد شد. مقدار اسید استتاریک مورد نیاز برآورد شده برای ایجاد درجه‌های مختلف آب‌گریزی با استفاده از آزمون WDPT به‌طور تجربی و همراه سعی و خطا و با توجه به پیشنهاد دکر و ریتسما (۱۹۹۴) تعیین شد. با توجه به حلالیت ناچیز اسید استتاریک در آب، از استون به‌عنوان حلالی غیرقطبی استفاده شد. مقدار حلالیت اسید استتاریک در استون با سعی و خطا به دست آمد و این حلالیت، در نهایت ۴۰ gr/lit (۴۰ گرم اسید استتاریک در یک لیتر استون) تعیین شد.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک آزمایش

مقدار	ویژگی خاک
۵۸	شن (%)
۱۳	رس (%)
۲۹	سیلت (%)
۳۲	آهک (%)
۱/۴۹	جرم مخصوص ظاهری (cm g^{-3})
۲/۶۳	جرم مخصوص حقیقی (cm g^{-3})
۶/۷	PH عصاره اشباع خاک
۴/۸	EC عصاره اشباع خاک (ds m^{-1})
۰/۵۸۶	ماده آلی (%)

جدول ۲- مشخصات آب مورد استفاده در پژوهش

SO_4^{2-}	HCO_3^{-3}	Mg^{+2}	Ca^{+2}	pH	EC dS/m
۰/۱۵	۲/۲	۰/۵	۱/۵	۷/۵	۰/۳۵۶

غلظت یون‌ها بر حسب میلی‌اکی‌والانت در لیتر گزارش شده است.

خاک کشاورزی آبدوست و درجه‌های مختلف خاک آب‌گریز از جنبه تحقیقاتی و کاربردی ضرورت دارد. تاکنون پژوهشی برای برآورد رواناب و رسوب در سطوح مختلف آب‌گریزی خاک به روش مستقیم و با استفاده از مدل فیزیکی انجام نشده است. هدف این پژوهش، شبیه‌سازی رواناب و رسوب تحت شدت‌های مختلف بارش به‌طور مستقیم با کاربرد مدل فیزیکی است. خاک مورد آزمایش به‌طور مصنوعی و با کاربرد اسید استتاریک در پنج سطح آب‌گریزی تهیه شده است. نتایج این پژوهش برای بررسی آثار آب‌گریزی در خاک‌ها، به منظور حفاظت و مدیریت آب و خاک در مناطق خشک و نیمه‌خشک مفید است.

مواد و روش‌ها

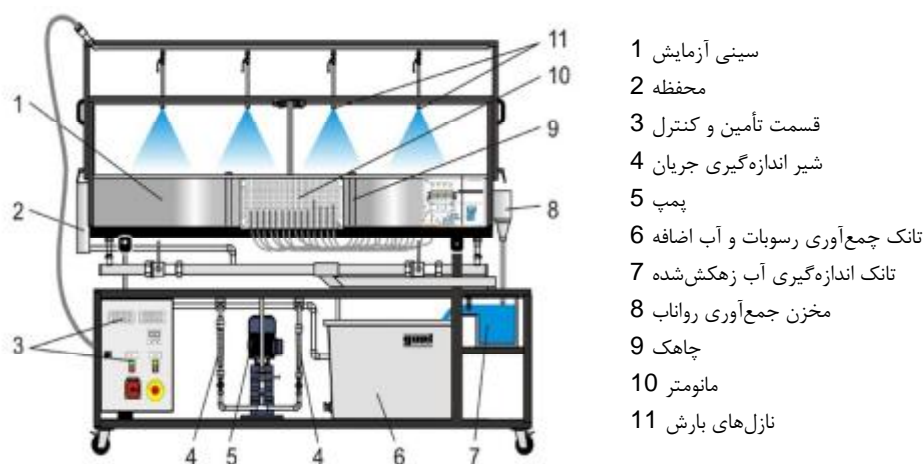
مشخصات آب و خاک مورد استفاده

ویژگی‌های خاک مورد آزمایش در جدول ۱ گزارش شده است. بافت خاک مورد آزمایش، لوم شنی بوده و جرم مخصوص ظاهری خاک در آزمایشگاه با استفاده از کلوخه خاک، به دست آمده است. با محاسبه حجم سینی خاک، وزن خاک مورد نیاز حساب و نتایج آنالیز کیفی آب مورد استفاده نیز در جدول ۲ ارائه شده است.

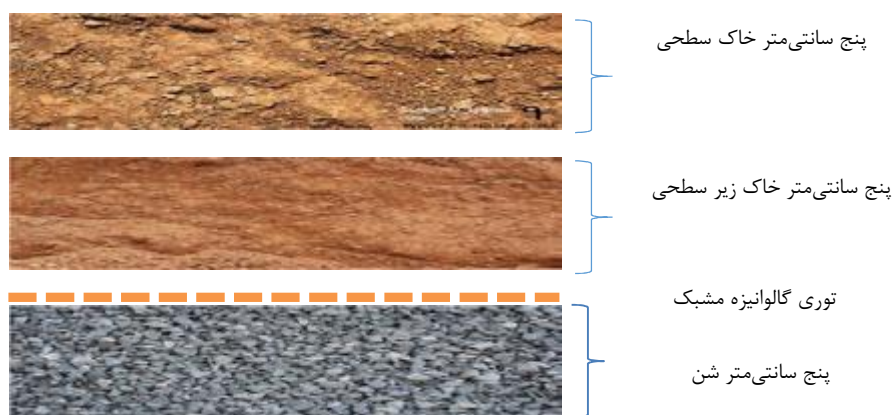
مدل فیزیکی دستگاه ویژه‌ای با نام دستگاه تحقیقاتی پیشرفته مطالعات هیدرولوژی^۱ و ساخت شرکت گونت^۲ آلمان است که به‌طور شماتیک در شکل ۱ نشان داده شده است. نیروی محرکه یک دستگاه پمپ الکتریکی با قدرت ۰/۵۵ کیلووات است. هشت نازل آبپاش بارانی با الگوی پاشش مربعی، ایجاد می‌کند. دبی پاشش با روتامتر زیر دستگاه تا حداکثر ۱۵۰۰ لیتر در ساعت تنظیم و آب مورد نیاز پاشش از تانک آب با حجم ۲۲۰ لیتر تأمین می‌شود. شیوه کار با دستگاه ساده و اجزای آن با توجه به هدف پژوهش، قابل تغییر و تنظیم است. در این پژوهش، مانومترها و چاهک از سامانه خارج شدند. دستگاه شامل یک سینی خاک به ابعاد ۲ متر طول، ۱/۲ متر عرض و ۲۰ سانتی‌متر عمق است. با توجه به ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر سینی، ۵ سانتی‌متر فوقانی بالای سینی، به‌عنوان ارتفاع آزاد در نظر گرفته شده است. ۵ سانتی‌متر از پایین سینی (کف سینی) شن ریخته شد تا آب‌گذری را آسان کند و

1- Advanced Hydrological Investigations

2- Gunt



شکل ۱- تصویر شماتیک اجزا دستگاه پژوهشاتی پیشرفته مطالعات هیدرولوژی برای انجام آزمایش



شکل ۲- تصویر شماتیک از داخل سینی آزمایش

اساس مناسب‌ترین توزیع احتمالاتی (لوگ پیرون تیپ ۳) در جدول ۵ گزارش شده است. با توجه به امکانات تنظیم روتامتر مدل فیزیکی مورد استفاده در این بخش از گزارش، شدت بارش مربوط به دوره بازگشت ۱۰۰۰ سال به‌عنوان شدت بارش پایه در نظر گرفته شد. پنج سطح احتمال وقوع ۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد نسبت به شدت بارش پایه، به‌عنوان تیمارهای شدت بارش اعمال شد. گفتنی است که شدت بارش با احتمال صفر، معادل شدت بارش پایه است (سطح احتمال صفر به معنای مفهوم مصطلح در مطالعات آمار نیست، بلکه تنها نشان‌دهنده شدت بارش پایه در نظر گرفته شده است. در واقع ده و بیست درصد کمتر و بیشتر از مقدار پایه نیز مورد مطالعه این پژوهش بوده است تا امکان بررسی واکنش خاک آبریز به پنج شدت بارش مدنظر باشد). با توجه به روتامتر کنترل دبی پاشش دستگاه، شدت جریان (میلی‌متر در دقیقه) با در نظر گرفتن سطح دستگاه

نتایج و بحث

آب‌گریزی مصنوعی خاک

مقدار اسید استناریک مورد نیاز برآورد شده برای ایجاد درجه‌های مختلف آب‌گریزی با استفاده از آزمون WDPT با سعی و خطا و به‌طور تجربی تعیین شد (جدول ۳).

شدت بارش

خاک آبریز شده، تحت شدت‌های مختلف رگبار با بارش مصنوعی قرار گرفت. برای برآورد شدت بارش سی دقیقه‌ای (I_{30})، رگبارهای ثبت شده در ایستگاه باران نگار شهرکرد (تحت نظارت شرکت آب منطقه‌ای استان چهارمحال و بختیاری) بررسی شد. مشخصات ایستگاه بررسی شده در جدول ۴ گزارش شده است. مقدار رگبار با استفاده از نرم‌افزار Hyfran تحلیل شد تا شدت بارش در دوره بازگشت‌های مختلف تحت توابع توزیع مناسب در سی دقیقه استخراج و ارزیابی شود. نتایج تحلیل فراوانی بر

همکاران (۲۰۱۶)؛ گومی و همکاران (۲۰۰۸)؛ کیزر و همکاران (۲۰۰۷)؛ میتاتا و همکاران (۲۰۱۰)، محمدی و همکاران (۲۰۱۸) و مولر و همکاران (۲۰۱۸)؛ چو و همکاران (۲۰۱۴) اشاره کرد.

نتایج نشان داده است که اثر آب‌گریزی خاک بر رواناب بیش از اثر شدت بارش است. در شدت بارش یکسان، حجم رواناب در تیمار خاک آبدوست تقریباً یک هفتم حجم رواناب به دست آمده از تیمار آب‌گریز خیلی شدید است. حال آن‌که دامنه تغییرات حجم رواناب در هر تیمار خاک با تغییر در شدت بارش، نوسان زیادی نداشته است. مقدار ضریب رواناب در این مطالعه، با توجه به تیمار خاک و تیمار شدت بارش محاسبه شده است. ضریب رواناب در تیمار شاهد (آبدوست) $0/008$ تا $0/011$ و در تیمارهای آب‌گریز $0/05$ تا $0/94$ مشاهده شد. تیمارهای خاک آب‌گریز شدید و خیلی شدید، کاملاً نفوذناپذیر و مشابه سطح آسفالت عمل میکنند و ضریب رواناب $0/79$ تا $0/94$ برآورد شده است (شکل ۳- ب). طبق مشاهدات، تنها یک میلی‌متر از لایه سطحی خاک آب‌گریز، خیس و رطوبت خاک در این لایه نازک، تحت بارش $0/75$ تا $0/88$ درصد حجمی مشاهده شد.

وزن رسوب اندازه‌گیری شده، تحت شدت‌های مختلف بارش وارد شده به تیمارهای خاک به صورت ترسیمی در شکل ۳- ج نشان داده شده است. حداکثر وزن رسوب اندازه‌گیری شده (۱۲ گرم) مربوط به خاک آبدوست و 20% درصد شدت بارش پایه و حداقل وزن رسوب (۲ گرم) مربوط به خاک آب‌گریز خیلی شدید و 20% شدت بارش پایه بود.

مقدار رسوبات خارج شده به همراه رواناب، با افزایش سطح آب‌گریزی کاهش و با افزایش سطح آب‌گریزی، رواناب خارج شده از سامانه افزایش یافت؛ اما مقدار رسوبات موجود در رواناب، کم‌تر شد. طبق مشاهدات، بارش سریعاً توسط خاک پس‌زده شد و فرصتی برای شسته شدن ذرات خاک نبود. بیزدم و همکاران (۱۹۹۳) و ولگمان و همکاران (۲۰۱۳) اینگونه بیان کرده‌اند که به دلیل سرعت نفوذ کم‌تر آب در وضعیت آب‌گریزی، شکسته شدن خاک‌دانه‌ها نیز کاهش می‌یابد؛ بنابراین شستگی ذرات خاک کم‌تر است. رای و اسمتم (۲۰۱۷) و هالت (۲۰۰۷) بیان کردند که به دلیل وجود پوشش‌های آب‌گریز روی خاکدانه‌ها، متلاشی شدن ذرات خاک در اثر نیروی آب و هوای

($1/3^*1$ مترمربع) به دبی (لیتر در ساعت) تبدیل شد؛ بنابراین ۵ سطح دبی در دستگاه شامل مقادیر ۸۰، ۹۰، ۱۰۰، ۱۱۰ و ۱۲۰ لیتر در ساعت در نظر گرفته شد. تعداد تیمارها شامل پنج تیمار آب‌گریزی و پنج تیمار شدت بارش (۲۵ تیمار) بوده است.

مقدار رواناب و رسوب

با استفاده از مدل فیزیکی در هر تیمار، مقدار رواناب و مقدار رسوب، اندازه‌گیری شد. نتایج آنالیز تیمار شاهد در جدول ۶ گزارش شده است. رطوبت اولیه خاک ۷ درصد حجمی، اندازه‌گیری شد. خاک تا عمق ۱۰ سانتی‌متری خیس شد.

در تیمارهای خاک آب‌گریز ۵ سانتی‌متر بالایی خاک (خاک سطحی)، آب‌گریز شد و ۵ سانتی‌متر زیرین (خاک زیر سطحی) آبدوست بوده است. رطوبت اولیه لایه زیر سطحی (خاک آبدوست) به میزان ۱۶ تا ۱۸ درصد حجمی اندازه‌گیری و رطوبت اولیه خاک آب‌گریز نیز ۳۰ و ۳۱ درصد حجمی اندازه‌گیری شد (جدول ۷).

حجم رواناب خارج شده از سیستم (cc)، ضریب رواناب محاسبه شده در هر آزمایش، وزن رسوب (gr) و حجم نفوذ عمقی اندازه‌گیری شده (cc) در شکل ۳ به صورت گرافیکی برای هر تیمار نشان داده شده است.

رواناب خارج شده از سامانه، تحت شدت‌های مختلف بارش وارد شده به تیمارهای خاک به صورت گرافیکی در شکل ۳- الف نشان داده شده است.

با افزایش شدت بارش در همه تیمارهای خاک، حجم رواناب خروجی از سامانه افزایش و از سوی دیگر، با افزایش سطح آب‌گریزی، حجم رواناب افزایش یافته است. حداکثر رواناب استحصال شده ۷۰۰۰ سی‌سی در تیمار خاک آب‌گریز خیلی شدید و بارش ۱۲۰ لیتر در ساعت (حداکثر شدت بارش) مشاهده و حداقل رواناب نیز ۶۰ سی‌سی در تیمار شاهد و بارش ۸۰ لیتر در ساعت (حداقل شدت بارش) مشاهده شد.

در خاک آبدوست، بخش عمده‌ای از باران جذب خاک می‌شود و لذا نسبت کم‌تری از حجم بارش به رواناب تبدیل می‌شود. در خاک‌های آب‌گریز به دلیل ماهیت دفع آب توسط خاک، درصد زیادی از بارش به رواناب تبدیل می‌شود. افزایش رواناب در خاک‌های آب‌گریز در مطالعات پیشین نیز گزارش شده است که می‌توان به نتایج فریرا و

کاهش رسوب که نتیجه مثبتی از آب‌گریزی در مدیریت خاک خواهد بود حاصل شود.

نفوذ آب در خاک‌های آب‌گریز نسبت به خاک‌های خیس شونده، آرام‌تر است. در تیمارهای خاک آب‌گریز مقدار نفوذ عمقی در دو سطح آب‌گریزی اندک و متوسط به میزان اندک (۳۸۰ تا ۹۵۰ سانتی‌مترمکعب) مشاهده شد؛ حال آن‌که نفوذ عمقی مشاهده شده در تیمار شاهد (خاک آبدوست) ۱۷/۵ تا ۲۳/۸ لیتر است. در تیمارهای آب‌گریزی شدید و خیلی شدید، هیچ مقدار نفوذ عمقی مشاهده نشد (شکل ۳-د).

تأثیر آب‌گریزی در کاهش نفوذ آب در خاک و در نتیجه، کاهش نفوذ عمقی در مطالعات قبلی بررسی شده است و با این نتایج مطابقت دارد (ریتسما و دکر، ۱۹۹۶؛ والیس و هوم، ۱۹۹۲؛ حالت، ۲۰۰۷).

محبوس کاهش می‌یابد و بنابراین فرسایش خاک کمتر می‌شود. آرسنگا و همکاران (۲۰۰۸) دریافتند که وجود پوشش‌های آب‌گریز روی خاکدانه‌ها پایداری خاک را افزایش و فرسایش خاک را کاهش داده است. در خاک‌های آب‌گریز با افزایش سطح آب‌گریزی مقدار رسوب کاهش و همچنین در هر سطح آب‌گریزی با افزایش شدت بارش مقدار رسوب نیز افزایش یافته است. در خاک‌های آب‌گریز به دلیل دفع آب، اختلاطی بین آب و خاک صورت نمی‌گیرد و مقدار رسوب روند کاهشی را نشان داده است. دوئر و همکاران (۲۰۰۰)؛ جیووانی و همکاران (۱۹۸۳)؛ آرسنگا و همکاران (۲۰۰۸)؛ پیکالو و امباگو (۱۹۹۹) و حالت (۲۰۰۷)، بیان کرده‌اند که از آن‌جا که آب‌گریزی می‌تواند در پایداری خاکدانه‌های خاک تأثیر بگذارد، می‌توان انتظار داشت که در صورت ایجاد پایداری روند

جدول ۳- مقدار اسید استناریک مورد نیاز برای ایجاد درجه‌های مشخص آب‌گریزی بر اساس آزمون WDPT

درجه آب‌گریزی	مقدار اسید استناریک g Kg-1 soil	زمان نفوذ قطره (ثانیه) (آزمون WDPT)
۱ (بدون آب‌گریزی)	۰	۱
۲ (آب‌گریزی جزئی)	۱۲	۳۰
۳ (آب‌گریزی زیاد)	۱۳	۳۰۰
۴ (بدون آب‌گریزی شدید)	۱۶	۲۰۰۰
۵ (آب‌گریزی خیلی شدید)	۲۲	۷۲۰۰

جدول ۴- رگبارهای بررسی شده برای تحلیل فراوانی با نرم‌افزار hyfran

نام ایستگاه	رودخانه	کد ایستگاه	تعداد رگبار ثبت شده	تعداد سال آماری موجود
شهرکرد	خررود	۲۱-۴۳۳	۱۸۹	۲۳

جدول ۵- تحلیل فراوانی شدت بارش سی دقیقه بر اساس مناسب‌ترین توزیع احتمالاتی (لوگ پیروسون تیپ ۳) نرم‌افزار hyfran

دوره بازگشت (سال)	۱۰۰۰۰	۱۰۰۰	۵۰۰	۲۰۰	۱۰۰	۲۰	۱۰	۲
مقدار بارش (میلی‌متر)	۱۱۴	۳۲/۷	۲۲/۴	۱۳/۶	۹/۲۵	۳/۶۷	۲/۳۹	۰/۶۷
شدت بارش (میلی‌متر بر دقیقه)	۳/۸	۱/۴۱	۱/۰۴	۰/۶۳	۰/۴۳	۰/۱۷	۰/۱۱	۰/۰۳

جدول ۶- نتایج آنالیز تیمار شاهد

وزن رسوب (گرم)	حجم رواناب (سی‌سی)	رطوبت نهایی (%)	حجم نفوذ عمقی (سی‌سی)	زمان بارش (دقیقه)	شدت بارش (لیتر در ساعت)
۱۲	۱۱۰	۶۱/۲	۲۸۶۳۰	۴۵	۱۲۰
۱۰	۹۰	۵۸/۸	۲۷۲۷۰	۴۷	۱۱۰
۸	۷۹	۵۱/۶	۲۶۶۴۰	۴۷	۱۱۰
۷	۷۰	۵۰/۴	۲۳۰۲۰	۴۹	۹۰
۷	۶۰	۴۸	۲۱۲۵۰	۵۲	۸۰

جدول ۷- نتایج اندازه‌گیری شده در تیمارهای آب‌گریز

نمود عمقی (سی‌سی)	رواناب (سی‌سی)	θ^{**}	ارتفاع خیس شده لایه آب‌گریز (متر)	θ^{*}	θ^{1*}	θ^{1*}	مدت بارش (دقیقه)	شدت بارش (لیتر در ساعت)	تیمار
۷۵۵	۱۱۰۰	۶۰	۰/۰۵	۵۵	۳۰	۱۸	۲۰	۱۲۰	آب‌گریزی جزئی
۷۵۵	۱۰۰۰	۶۰	۰/۰۵	۵۵	۳۰	۱۸	۲۰	۱۱۰	
۷۰۰	۹۰۰	۶۰	۰/۰۵	۵۰	۳۰	۱۸	۲۰	۱۰۰	
۷۰۰	۸۰۰	۵۰	۰/۰۵	۵۰	۳۰	۱۸	۲۰	۹۰	
۶۰۰	۷۲۰	۵۰	۰/۰۵	۵۰	۳۰	۱۶	۲۰	۸۰	
۴۳۰	۳۰۰۰	۵۸	۰/۰۵	۵۵	۳۱	۱۸	۹/۵	۱۲۰	آب‌گریزی زیاد
۴۲۰	۲۷۰۰	۵۸	۰/۰۵	۵۲	۳۱	۱۷	۹/۵	۱۱۰	
۴۰	۲۴۵۰	۵۸	۰/۰۵	۵۰	۳۱	۱۷	۹/۵	۱۰۰	
۳۸۰	۲۳۰۰	۵۴	۰/۰۵	۴۵	۳۱	۱۷	۱۰	۹۰	
۳۰۰	۲۰۰۰	۵۳	۰/۰۵	۴۵	۳۱	۱۷	۱۰	۸۰	
۰	۶۳۵۰	۸۸	۰/۰۰۱	۱۶	۳۱	۱۶	۸	۱۲۰	آب‌گریزی شدید
۰	۶۲۰۰	۸۰	۰/۰۰۱	۱۶	۳۱	۱۶	۸	۱۱۰	
۰	۵۹۰۰	۸۰	۰/۰۰۱	۱۶	۳۱	۱۶	۷/۵	۱۰۰	
۰	۵۰۰۰	۷۵	۰/۰۰۱	۱۶	۳۱	۱۶	۷/۵	۹۰	
۰	۴۳۰۰	۷۵	۰/۰۰۱	۱۵	۳۱	۱۵	۷/۵	۸۰	
۰	۷۰۰۰	۸۸	۰/۰۰۱	۱۵	۳۱	۱۵	۷/۵	۱۲۰	آب‌گریزی خیلی شدید
۰	۶۵۰۰	۸۰	۰/۰۰۱	۱۶	۳۱	۱۶	۷/۵	۱۱۰	
۰	۵۹۰۰	۷۶	۰/۰۰۱	۱۶	۳۱	۱۶	۷/۵	۱۰۰	
۰	۵۲۰۰	۷۵	۰/۰۰۱	۱۷	۳۱	۱۷	۷/۵	۹۰	
۰	۴۳۵۰	۶۵	۰/۰۰۱	۱۷	۳۱	۱۷	۷	۸۰	

θ^{*} و θ^{**} به ترتیب نشان‌دهنده رطوبت حجمی لایه آبدوست و آب‌گریز، اندیس ۱ رطوبت اولیه، اندیس ۲ رطوبت نهایی

نتیجه‌گیری

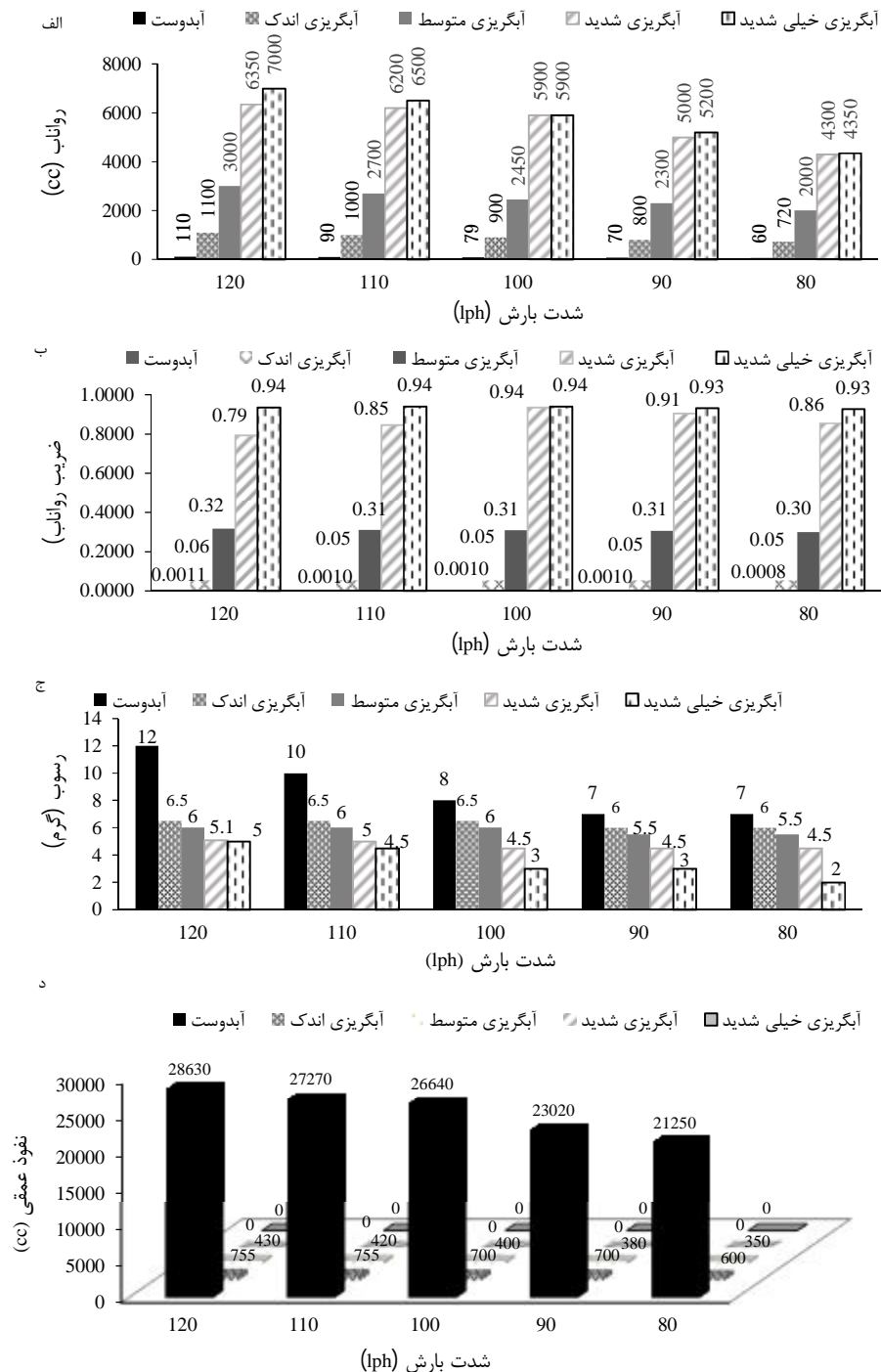
نتایج پژوهش نشان می‌دهد که با کاهش سطح آب‌گریزی رواناب کم‌تری ایجاد می‌شود. با توجه به در نظر گرفتن توأم اثر آب‌گریزی و شدت بارش، مشاهده شد که عامل مهارکننده حجم رواناب، آب‌گریزی خاک بوده است. با توجه به نتایج مدل فیزیکی، ضریب رواناب محاسبه شد. حداکثر ضریب رواناب، در تیمار آب‌گریز خیلی شدید و شدت بارش ۲۰+ درصد شدت بارش پایه و به میزان ۰/۹۴ بوده است. در تیمارهای خاک آبدوست، ضریب رواناب ۰/۰۰۸ تا ۰/۰۱۱ برآورد شد.

در تیمارهای آب‌گریز، جزء در دو سطح آب‌گریزی جزئی و زیاد که نفوذ عمقی کمی مشاهده شده است، در دو سطح آب‌گریزی شدید و خیلی شدید نفوذ عمقی مشاهده نشد.

در این سطوح آب از لایه یک میلی‌متری خاک پایین‌تر نرفت.

با توجه به نتایج به دست آمده، با افزایش سطح آب‌گریزی میزان رسوب استحصال شده کاهش یافته است. حداکثر وزن رسوب اندازه‌گیری شده (۱۲ گرم) مربوط به خاک آبدوست و ۲۰%+ شدت بارش پایه و حداقل وزن رسوب (۲ گرم) مربوط به خاک آب‌گریز خیلی شدید و ۲۰%- شدت بارش پایه بوده است. اثر آب‌گریزی بر میزان رسوب مثبت ارزیابی شد.

جمع‌بندی نتایج به دست آمده نشان‌دهنده اثر مثبت آب‌گریزی خاک در کاهش رسوب علی‌رغم افزایش رواناب و افزایش ضریب رواناب و کاهش نفوذ عمقی است.



شکل ۳- پارامترهای برآورد شده در هر آزمایش (الف) حجم رواناب، (ب) ضریب رواناب، (ج) وزن رسوب، (د) حجم نفوذ عمقی

منابع

۲. گرامی لوشابی ز. عرب خدری م. اسدی ح. و بیات ر. ۱۳۹۵. تأثیر نوسانات زمانی فرساینده‌گی باران بر تغییرات فصلی رسوبدهی معلق (مطالعه موردی: حوزه کسلیان). پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز. ۷(۱۴): ۱۶۷-۱۷۶.

۱. بیرامی ح. نیشابوری م. ح. ناظمی ا. ح. و عباسی ف. ۱۳۹۴. تأثیر آب‌گریزی خاک بر مشخصات نفوذ در دو خاک لوم رسی و لوم شنی. نشریه دانش آب و خاک. ۲۵(۲): ۱۸۱-۱۹۲.

- JB Dixon and DG Schulze. pp. 69–107. Soil Science Society of America. Madison.
15. Doerr S. H. Shakesby S. H. and Walsh R. P. D. 2000. Soil water repellency: its causes characteristics and hydro-geomorphological significance. *Earth-Science Reviews*. 51: 33-65.
 16. Dos Santos J. C. N. de Andrade E. M. Medeiros P. H. A. Guerreiro M. J. S. and de Queiroz Palácio H. A. 2017. Effect of rainfall characteristics on runoff and water erosion for different land uses in a tropical semiarid region. *Water Resource Management*. 31(1):173-185.
 17. Ferreira R. V. Serpa D. Cerqueira M. A. and Keizer J. J. 2016. Short-time phosphorus losses by overland flow in burnt pine and eucalypt plantations in north-central Portugal: a study at micro-plot scale. *Science of the Total Environment*. 551: 631-639.
 18. Gao y. Lin Q. Liu H. Wu H. Alamus. 2018. Water repellency as conditioned by physical and chemical parameters in grassland soil. *Catena*. 160: 310-320.
 19. Giovannini G. Luchesi S. Cervelli S. 1983. Water substances and aggregate stability in hydrophobic soils. *Soil Science*. 135: 110-113.
 20. Gomi T. Sidle R. C. Ueno M. Miyata S. and Kosugi K. 2008. Characteristics of overland flow generation on steep forested hillslopes of central Japanese Journal of Hydrology. 361: 275-290.
 21. Hallet PD 2007. An introduction to soil water repellency. *Proceedings of the 8th International Symposium on Adjuvants for Agrochemicals International Society for Agrochemical Adjuvants (ISAA) Columbus Ohio USA ISBN 978-0-473-12388-8*.
 22. Heryanto R. Hasan M. Abdullaha E. C. and Kumoro A. C. 2007. Solubility of Stearic Acid in Various Organic Solvents and Its Prediction using Non-ideal Solution Models *ScienceAsia*. 33: 469-472.
 23. Jeyakumar P. Müller K. Deurer M. Van den Dijssel. C. Mason K. Le Mire. G. and Clothier. B. 2013. A novel approach to quantify the impact of soil water repellency on run-off and solute loss. *Geoderma*. 121-130.
 24. Keizer J. J. Doerr S.H. Malvar M. C. Ferreira A. J. D. and Pereira V. M. F. G. 2007. Temporal and spatial variations in topsoil water repellency throughout a crop-rotation cycle on sandy soil in north-central Portugal. *Hydrological Processes*. 21: 2317-2324.
 25. Leelamanie DAL. Karube J. and Yoshida A. 2008. Characterizing water repellency
 ۳. نورمهند ن. طباطبایی. س. ح. نوری امامزاده‌ئی. م. ر. قربانی دشتکی ش. و هوشمند ع. ۱۳۹۴. تأثیر کاربرد لجن فاضلاب شهری بر آب‌گریزی و منحنی رطوبتی خاک نشریه دانش آب و خاک. ۲۵(۳): ۷۵-۹۰.
 4. Agassi M. 1996. *Soil Erosion Conservation and Rehabilitation*. Marcel Dekker. New York. 158 p.
 5. Alavinia M. Nasirisaleh F. and Asadi H. 2018. Effects of variant rainfall intensity events on runoff and interrill erosion. *Interational journal of Sediment research*. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2018.11.001>
 6. Arcenegui V. J. Mataix-Solera C. Gueuero R. Zomoza J. Malaix-Beneyto and Garcia-Orenes F. 2008. Intermediate effects of wildfires on water repellency and aggregate stability in Mediterranean calcareous soils. *Catena*. 74: 219-226.
 7. Bisdom E. B. A. Dekker L. W. and Schoute J. F. T. 1993 Water repellency of sieve fractions from sandy soils and relationships with organic material and soil structure *Geoderma*. 56: 105-118.
 8. Chau H. W. A. Biswas V. Vujanovic and Cheng Si B. 2014. Relationship between the severity persistence of soil water repellency and the critical soil water content in waterrepellent soils. *Geoderma*. 221-222: 113-120
 9. Cuomo S. and Della Sala M. 2013. Rainfall-induced infiltration runoff and failure in steep unsaturated shallow soil deposits. *Engineering Geology*. 162: 118-127.
 10. Da Silva R. M. R. M. Guimarães Santos C. A. dos Santos Y. G. 2017. Evaluation and modeling of runoff and sediment yield for different land covers under simulated rain in a semiarid region of Brazil *International Journal of Sediment Research* <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijsrc.2017.04.005>.
 11. De Lima J. L. M. P. Tavares P. Singh V. P. and de Lima M. I. P. 2009. Investigating the nonlinear response of soil loss to storm direction using a circular soil flume. *Geoderma*. 152(1-2): 9-15.
 12. Dekker L. W. and Ritsema C. J. 1994. How water moves in a water repellent sandy soil. I. Potential and actual water repellency. *Water Resources Research*. 30: 2507-2517.
 13. Dekker L. W. Oostindie K. and Ritsema C. J. 2005. Exponential increase of publications related to soil water repellency. *Australian Journal of Soil Research*. 43: 403-441.
 14. Deng Y. and Dixon J. B. 2002. Soil organic matter and organic-mineral interactions. In *Soil Mineralogy with Environmental Applications*. SSSA Book Series No 7. Eds

a karst area SW China. *Geoderma*. 330: 30-40.

38. Zhang S. Lourenço S. D. N. Cleall P. J. Chui T. F. M. Ng .K. Y. and Millis A. W. S. 2017. Hydrologic behavior of model slopes with synthetic water repellent soils. *Journal of Hydrology*. 554: 582-599.
26. Millán M. M. 2014. Extreme hydrometeorological events and climate change predictions in Europe. *Journal of Hydrology*. 518(PB): 206-224.
27. Mohammadi S. Homaee. M. and Sadeghi S. H. R. 2018 Runoff and sediment behavior from soil plots contaminated with kerosene and gasoil *Soil & Tillage Research*. 182: 1-9
28. Müller K. Mason K. Gastelum Strozzi A. Simpson R. Komatsu T. Kawamoto R. and Clothier B. 2018. Runoff and nutrient loss from a water-repellent soil. *Geoderma*. 322: 28-37.
29. Piccolo A. and Mbagwu S. C. 1999. Role of hydrophobic components of soil organic matter in soil aggregate stability. *Soil Science Society of America Journal*. 68: 1801-1810.
30. Ran Q. Su D. li P. and HE Z. 2012. Experimental study of the impact of rainfall characteristics on runoff generation and soil erosion. *Journal of Hydrology*. 424-425: 99-111.
31. Ritsema C. J. and Dekker L. W. 1996. Water repellency and its role in forming preferred flow paths in soils. *Australian Journal of Soil Research*. 34:475-487.
32. Rye C. F. and Smettem K. R. J. 2017. The effect of water repellent soil surface layers on preferential flow and bare soil evaporation. *Geoderma*. 289: 142-149.
33. Sadeghi S. H. R. M. Moatamednia and Behzadfar M. 2011. Spatial and Temporal Variation in the Rainfall Erosivity Factor in Iran. *Journal of Agricultural Science and Technology*. 13: 451-464.
34. Vogelmann E. S. Reichert J. M. Prevedello J. Consensa C. O. B. Oliveira A. E. Awe G. O. and Mataix-Solera J. 2013. Threshold water content beyond which hydrophobic soils become hydrophilic: The role of soil texture and organic matter content. *Geoderma*. 209(1): 177-187.
35. Wallis M. G. and Home D. J. 1992. Soil water repellency. In: *advances in soil sciences*. Edited by B.A. Stewart. Springer-Verlag New York. 96: 1-42.
36. Wei W. Jia F. Yang L. Chen L. Zhang H. and Yu Y. 2014. Effects of surficial condition and rainfall intensity on runoff in a loess hilly area China. *Journal of Hydrology*. 513: 115-126.
37. Yan Y. Dai Q. Yuan Y. Peng X. Zhao L. and Yang J. 2018. Effects of rainfall intensity on runoff and sediment yields on bare slopes in