

تأثیرپذیری زمان شروع و ضریب رواناب از شدت بارندگی و رطوبت پیشین خاک در پلات‌های آزمایشگاهی

عبدالواحد خالدی درویشان^۱، سید حمیدرضا صادقی^{۲*}، مهدی همایی^۳ و محمود عرب‌خردی^۴

چکیده

شدت بارندگی، رطوبت پیشین خاک و تندی شیب از مهم‌ترین عوامل فیزیکی-اقلیمی هستند که اثر یک‌جانبه و متقابل آن‌ها کنترل‌کننده پاسخ هیدرولوژیکی آبخیز به رویداد بارندگی است. پژوهش حاضر با هدف بررسی اثرات یک‌جانبه و متقابل شدت بارندگی و رطوبت پیشین خاک بر زمان شروع و ضریب رواناب در خاک مراتع ییلاقی دامنه‌های شمالی البرز با بافت شنی لومی و در شرایط آزمایشگاهی در چهار سطح شدت بارندگی و پنج سطح رطوبت پیشین خاک انجام شد. نتایج نشان داد که ضرایب همبستگی شدت بارندگی و رطوبت پیشین خاک با زمان شروع رواناب به ترتیب با مقادیر $0.709-$ و $0.628-$ و با ضریب رواناب با مقادیر 0.517 و 0.804 در سطح 0.01 معنی‌دار بود. بر طبق نتایج پژوهش حاضر اثر متقابل معنی‌دار بین شدت بارندگی و رطوبت پیشین خاک بر زمان شروع رواناب از نوع هم‌زدایی تأیید شد. تفکیک سطوح تیمارها وجود نقاط عطف معنی‌دار در زمان شروع و ضریب رواناب را به ترتیب در شدت‌های بارندگی حدود 40 و 60 میلی‌متر بر ساعت و در زمان شروع رواناب در حد فاصل سطوح رطوبت خاک 12 تا 19 درصد تأیید کرد.

واژه‌های کلیدی: پاسخ هیدرولوژیکی، رطوبت خاک، شبیه‌سازی باران، مراتع البرز.

ارجاع: خالدی درویشان ع. صادقی س. ح. همایی م و عرب‌خردی م. ۱۳۹۳. تأثیرپذیری زمان شروع و ضریب رواناب از شدت بارندگی و رطوبت پیشین خاک در پلات‌های آزمایشگاهی. مجله پژوهش آب ایران. ۸(۱۵): ۴۱-۴۹.

۱- استادیار گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تربیت مدرس، نور.
۲- استادیار گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تربیت مدرس، نور.
۳- استادیار گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس، تهران.
۴- استادیار پژوهشی، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری کشور، تهران.

* نویسنده مسئول: sadeghi@modares.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۰۳/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۳/۰۶

مقدمه

عامل‌های اصلی تخریب و انتقال خاک در فرسایش آبی، برخورد قطره‌های باران با سطح خاک و رواناب هستند که عامل اول ویژگی ذاتی باران بوده و قابل کنترل نیست ولی عامل دوم دلیل‌های مختلفی دارد که قابل اندازه‌گیری و کنترل هستند. در مجموع می‌توان گفت اثرات متقابل عامل‌های مختلف درآبخیز کنترل‌کننده پاسخ هیدرولوژیکی آن به شکل رواناب است (کاستیلو و همکاران، ۲۰۰۳).

رواناب با سپری شدن مدت زمانی پس از بارندگی شکل گرفته و تا حد زیادی وابسته به ویژگی‌های بارندگی، خاک و شیب است. شدت بیشتر باران و کاهش ظرفیت آب‌گیری لایه‌های سطحی خاک موجب افزایش حجم رواناب شده و در ادامه نیروی بیشتری برای کنش و انتقال ذرات خاک آماده می‌شود. هرچند اولویت‌بندی عامل‌های مؤثر بر زمان شروع و ضریب رواناب تا حد زیادی به مقیاس مورد بررسی وابسته است (کامرات، ۲۰۰۴) اما صرف‌نظر از اولویت، مجموعه این عامل‌های در مقیاس حوزه آبخیز و پلات تفاوت زیادی با یکدیگر ندارند و در مجموع می‌توان گفت ویژگی‌های بارندگی، شرایط خاک، پوشش گیاهی و شیب در تمامی مقیاس‌ها از جمله مهم‌ترین عامل‌های مؤثر بر زمان تشکیل و ضریب رواناب هستند (شریفی و همکاران، ۱۳۸۳). از طرف دیگر آگاهی از زمان شروع و ضریب رواناب و شناخت عامل‌های مؤثر بر آن نیز برای ارایه راه‌کار مدیریتی منجر به ایجاد تأخیر در وقوع و کاهش مقدار رواناب ضروری است. اهمیت رطوبت پیشین خاک تا حدی است که در بارندگی‌های با دوره بازگشت‌های کمتر از ۱۵ سال می‌تواند رواناب را به طرز کاملاً معنی‌داری تحت تأثیر قرار دهد (کاستیلو و همکاران، ۲۰۰۳). اگرچه افزایش شدت بارندگی در بیشتر خاک‌ها با کاهش نفوذ، باعث افزایش رواناب می‌شود اما گاهی می‌تواند با افزایش نفوذ به دلیل عدم تجانس مکانی ویژگی‌های نفوذ لایه سطحی خاک، موجب کاهش رواناب شود (آسولین و بن‌هور، ۲۰۰۶ و پارسونس و استون، ۲۰۰۶). صرف‌نظر از موارد گفته شده، امکان اثر متقابل شدت بارندگی و رطوبت پیشین خاک بر نفوذ و رواناب نیز بر اهمیت بررسی آن‌ها می‌افزاید.

نتایج پژوهش‌های قبلی به طور کلی نشان‌دهنده اثر معکوس رطوبت پیشین خاک بر زمان شروع (هاوکه و همکاران، ۲۰۰۶ و سیگر، ۲۰۰۷) و اثر مستقیم آن بر ضریب رواناب هستند (ارشم و همکاران، ۱۳۸۸؛ وهابی و همکاران، ۱۳۸۸؛ صادقی و همکاران، ۱۳۸۹؛ آئرسوالد و همکاران، ۱۹۹۴؛ کاستیلو و

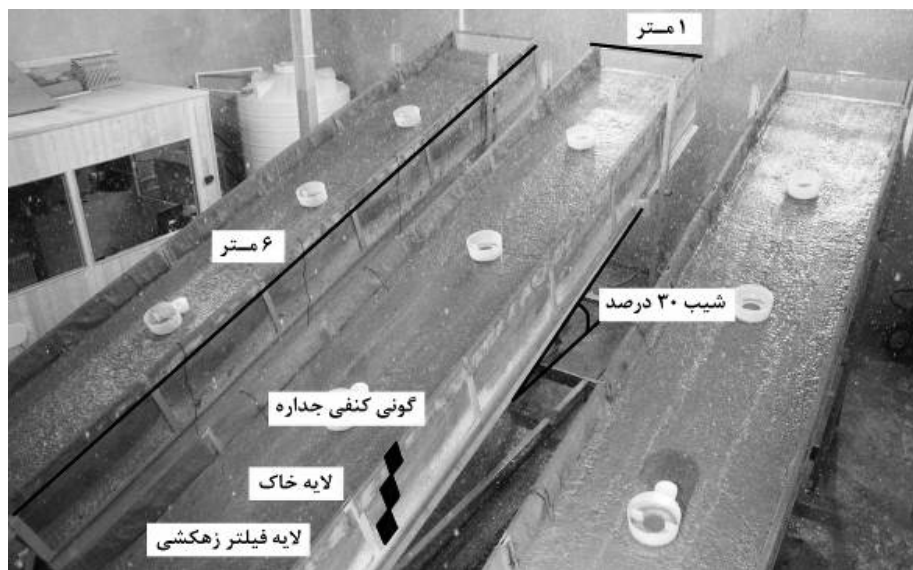
همکاران، ۲۰۰۳؛ هاوکه و همکاران، ۲۰۰۶؛ لی‌بیسونایس و همکاران، ۱۹۹۵ و روئیزسینوگا و همکاران، ۲۰۱۰). در مواردی نیز اثر مستقیم رطوبت پیشین خاک بر زمان شروع رواناب (آئرسوالد و همکاران، ۱۹۹۴) و یا اثر غیرمعنی‌دار رطوبت پیشین خاک بر ضریب رواناب (سیگر، ۲۰۰۷) گزارش شده است. در مورد اثر شدت بارندگی بر زمان شروع و ضریب رواناب نیز نتایج پژوهش‌های قبلی در مجموع نشان از اثر معکوس شدت بارندگی بر زمان شروع رواناب و اثر مستقیم آن بر ضریب رواناب (آرناتز و همکاران، ۲۰۰۷ و هاوکه و همکاران، ۲۰۰۶) هستند. اما در مواردی اثر غیرمعنی‌دار شدت بارندگی بر زمان شروع و ضریب رواناب نیز گزارش شده است (دفرشا و میلسه، ۲۰۱۲ و سیگر، ۲۰۰۷). سوابق بررسی اثر متقابل شدت بارندگی و رطوبت پیشین خاک بر زمان شروع و ضریب رواناب نیز در پژوهش‌های قبلی به طور کلی ضمن تأیید اثر متقابل، در برخی موارد نشان‌دهنده افزایش اثر رطوبت پیشین خاک با کاهش شدت بارندگی (کاستیلو و همکاران، ۲۰۰۳ و هاوکه و همکاران، ۲۰۰۶) و در دیگر موارد نشان‌دهنده اهمیت بیشتر سایر عامل‌های از قبیل بافت خاک و تندی شیب (دفرشا و میلسه، ۲۰۱۲) نسبت به شدت بارندگی هستند.

جمع‌بندی سوابق پژوهش نشان می‌دهد که اگرچه اثر یک جانبه رطوبت پیشین خاک و شدت بارندگی در حالت‌های صحرائی و آزمایشگاهی بررسی شده اما از طرفی به دلیل کم بودن سطح‌های تیمارهای مورد بررسی، تاکنون نقاط عطف رفتار هیدرولوژیکی خاک در رطوبت‌های پیشین مختلف آشکارا مورد بحث قرار نگرفته و از طرف دیگر اثرات متقابل عامل‌های مذکور بر هم‌دیگر به خوبی مشخص نشده است. بر همین اساس در این پژوهش در راستای تعیین و تحلیل نسبی نقاط عطف پاسخ هیدرولوژیکی خاک، درصد بررسی سطح‌های کامل‌تری از تیمارهای رطوبت پیشین خاک و شدت بارندگی برآمده و در نهایت اثر متقابل عامل‌های مذکور و نوع روابط در حالت‌های مختلف را نیز بررسی کرده است.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش در آزمایشگاه شبیه‌ساز باران و فرسایش دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تربیت مدرس انجام شد. سه پلات آزمایشگاهی با ابعاد ۱×۶ مترمربع و عمق ۰/۵ متر، تعداد ۲۷ نازل تحت فشار در ارتفاع حداقل و حداکثر ۴ و ۶ متری از سطح پلات‌ها همراه با زیرسامانه‌های ذخیره‌سازی و انتقال آب، کنترل فشار و شدت و مدت باران در این پژوهش

استفاده شد. شکل ۱ پلات‌های خاک مورد استفاده در پژوهش و اجزای مختلف آن‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۱- پلات‌های خاک مورد استفاده در پژوهش

ساختمان اصلی خاک (ارشم و همکاران، ۱۳۸۸؛ آغاسی و برادفورد، ۱۹۹۹ و دفرشا و همکاران، ۲۰۱۱) و حذف بقایای گیاهی و سنگ‌ریزه‌ها (آغاسی و برادفورد، ۱۹۹۹) و رعایت لایه‌بندی مناسب انجام شد. سپس سنسورهای دیتالاگر رطوبت‌سنج خاک به تعداد ۴ عدد در هر پلات، در فواصل ۱/۲ متر در جهت طولی (ترامبلی و همکاران، ۲۰۱۰) و با فاصله حداقل ۱۰ سانتی‌متر از جداره شیشه‌ای در هر یک از پلات‌ها نصب شد.

پس از انتقال خاک به داخل پلات‌ها با توجه به اهمیت و اثرات وزن مخصوص ظاهری در مقاومت سطحی خاک در برابر قطره‌های باران و رواناب (لوک، ۱۹۸۵)، از لوله‌ای پی‌وی‌سی به طول و قطر به ترتیب ۹۵ و ۱۵ سانتی‌متر و پر شده با مخلوط ماسه و سیمان به‌عنوان غلطک استفاده شد. برای رسیدن به تعداد بهینه حرکت رفت و برگشت غلطک روی خاک پس از دفعات مشخص اقدام به برداشت نمونه از عمق ۲ تا ۵ سانتی‌متری خاک و اندازه‌گیری وزن مخصوص ظاهری آن شده و در نهایت تعداد رفت و برگشت ۳۵ تا ۴۰ بار برای رسیدن به وزن مخصوص ظاهری حدود ۱/۴ گرم بر سانتی‌مترمکعب تعیین شد. از آنجایی که رطوبت پیشین خاک در دقیقه‌های اولیه پس از شروع بارندگی بیشترین اثر مستقیم در مقاومت خاک‌دانه‌ها و فرآیند تخریب و تغییر ویژگی‌های سطح خاک و نیز زمان تشکیل رواناب را دارد

قبل از انتقال خاک به پلات‌ها، برای شبیه‌سازی بهتر شرایط طبیعی خاک، لایه زهکشی از جنس پوکه معدنی با تغییر تدریجی دانه‌بندی از بادامی تا ریزدانه (ساختار فیلتری) به ضخامت ۱۵ سانتی‌متر در کف پلات‌ها تعبیه شد (داربوکس و همکاران، ۲۰۰۱ و دفرشا و همکاران، ۲۰۱۱). سپس با توجه به اینکه سرعت حرکت رواناب سطحی به دلیل کاهش اصطکاک در مرز خاک و جداره شیشه‌ای پلات افزایش خواهد یافت، یک لایه گونی کنفی نفوذپذیر در حد فاصل فیلتر و خاک قرار داده شد به نحوی که ادامه آن اطراف خاک را پوشش داده و علاوه بر جلوگیری از اختلاط خاک و لایه فیلتر (داربوکس و همکاران، ۲۰۰۱)، با افزایش ضریب اصطکاک از افزایش سرعت حرکت رواناب در مرز خاک و جداره شیشه‌ای جلوگیری کند. خاک مورد بررسی از لایه ۲۰ سانتی‌متری سطح (کوکال و سرکار، ۲۰۱۰) مراتع بیلاقی دامنه‌های شمالی البرز در حد فاصل جاده کدیر- کجور در اواخر تابستان ۱۳۹۰ برداشت و به محل آزمایشگاه منتقل شد. بافت خاک منطقه شنی لومی، مواد آلی ۲/۱۷ درصد، وزن مخصوص ظاهری ۱/۳۸ گرم بر سانتی‌مترمکعب، اسیدیته ۷/۹۵ و هدایت الکتریکی ۷۵/۵ میکروموس بر سانتی‌متر ارزیابی شد. سپس آماده‌سازی خاک برای انتقال به پلات‌ها بر اساس روش کوکال و سرکار (۲۰۱۱) از طریق هوا خشک کردن خاک تا حد رطوبت بهینه، استفاده از الک ۸ میلی‌متری به دلیل حفظ

برداشت مقادیر مجموع رواناب در ۵ بازه زمانی ۲ دقیقه‌ای (۱۰ دقیقه) در هر پلات انجام شده و در نهایت تمامی داده‌های حاصل برای تحلیل آماری نتایج به نرم‌افزار SPSS18 وارد شد.

نتایج و بحث

در این پژوهش با هدف بررسی اثرات یک جانبه و متقابل شدت بارندگی و رطوبت پیشین خاک بر زمان شروع و ضریب رواناب انجام شد. زمان شروع و ضریب رواناب در تیمارهای مختلف رطوبت پیشین خاک و شدت بارندگی در هر یک از تیمارهای مورد بررسی در جدول ۲ ارائه شده است. جدول ۳ نیز ضریب‌های همبستگی اسپیرمن^۱ (سیگر، ۲۰۰۷) و کندال^۲ بین عامل‌های مورد بررسی را نشان می‌دهد.

ضرایب همبستگی مورد بررسی در هر دو روش اسپیرمن و کندال همسو و معنی‌دار (سطح اعتماد ۹۹ درصد) نیز هستند. ضریب همبستگی شدت بارندگی و رطوبت پیشین خاک با زمان شروع رواناب به ترتیب با مقادیر ۰/۷۰۹- و ۰/۶۲۸- در سطح ۰/۰۱ معنی‌دار و طبیعتاً معکوس است در حالی که ضریب همبستگی شدت بارندگی و رطوبت پیشین خاک با ضریب رواناب به ترتیب با مقادیر ۰/۵۱۷ و ۰/۸۰۴ در سطح ۰/۰۱ معنی‌دار و مستقیم است. این یافته‌ها در حالت ضریب همبستگی رطوبت پیشین خاک و زمان شروع رواناب با نتایج سیگر (۲۰۰۷) همسو است اما در دیگر حالات با نتایج ایشان مغایرت دارد.

نتایج نشان داد که به طور کلی شدت بارندگی و رطوبت پیشین خاک در سطح اعتماد ۹۹ درصد تأثیر معنی‌دار معکوس و مستقیم به ترتیب بر زمان شروع و ضریب رواناب دارند. این یافته در بخش اثر مستقیم شدت بارندگی بر ضریب رواناب با یافته‌های پارسونس و استون (۲۰۰۶) و آرنائز و همکاران (۲۰۰۷) و در بخش اثر مستقیم رطوبت پیشین خاک بر ضریب رواناب با یافته‌های ارشم و همکاران (۱۳۸۸)، صادقی و همکاران (۱۳۸۹)، آئرسوالد و همکاران (۱۹۹۴)، لی بیسونایس و همکاران (۱۹۹۵) و کاستیلو و همکاران (۲۰۰۳) و در بخش اثرات غیرمستقیم شدت بارندگی بر زمان شروع رواناب با یافته‌های آرنائز و همکاران (۲۰۰۷) و در بخش اثرات غیرمستقیم رطوبت

(هاوکیه و همکاران، ۲۰۰۶) و با گذشت زمان و افزایش رطوبت لایه سطحی خاک آثار مستقیم رطوبت پیشین کمتر می‌شود، پس مدت زمان آزمایش برابر با ۱۰ تا ۱۵ دقیقه (بسته به زمان تشکیل رواناب) تعیین شد. سپس با استناد به آمار باران‌نگاری ایستگاه سینوپتیک کجور و در نهایت بررسی منحنی‌های شدت-مدت-فراوانی تهیه شده برای ایستگاه‌های قراخیل و نوشهر، شدت‌های بارندگی ۳۰، ۷۰، ۵۰ و ۹۰ میلی‌متر بر ساعت به‌عنوان دامنه شدت‌های دارای فراوانی بالا (دوره بازگشت کمتر از ۲۰ سال) و مدت زمان برابر با مدت آزمایش (۱۰ تا ۱۵ دقیقه) تعیین شد.

سطح‌های رطوبت خاک مورد بررسی در این پژوهش با در نظر گرفتن حالت هوا خشک و رطوبت نزدیک به اشباع (ارشم و همکاران، ۱۳۸۸) و به نسبت مشابه با گزارش‌های موجود (محمدپور، ۱۳۸۸) و در نظر گرفتن ۳ سطح رطوبتی دیگر در حد فاصل آن‌ها (۱۹، ۲۹ و ۳۶ درصد) تعیین شد. در نهایت تعداد تیمارهای ترکیبی حاصل از ضرب تعداد سطح‌های شدت بارندگی در تعداد سطح‌های رطوبت پیشین خاک (۴×۵ تیمار) به تعداد ۲۰ تیمار و در طرح فاکتوریل (دِفِرشا و مِلِسه، ۲۰۱۲ و اکوه، ۱۹۹۱) با سه تکرار برای هر تیمار (در مجموع ۶۰ پلات داده) بررسی شد. شیب سطح خاک در پلات‌های مورد بررسی نیز به صورت ثابت و برابر با ۳۰ درصد و به طور تقریبی مطابق با شرایط واقعی منطقه مادری خاک در نظر گرفته شد. جدول ۱ تیمارهای مورد بررسی و ترکیب آن‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۱- تیمارهای شدت بارندگی و رطوبت پیشین خاک

تیمار	نماد	سطح	ویژگی حاکم
رطوبت پیشین خاک (درصد حجمی)	H _۱	۱۲	کاملاً خشک
	H _۲	۱۹	نسبتاً خشک
	H _۳	۲۹	میانگین رطوبت سالانه
	H _۴	۳۶	مرطوب
	H _۵	۴۴	نزدیک به اشباع
شدت بارندگی (میلی‌متر بر ساعت)	I _۱	۳۰	
	I _۲	۵۰	
	I _۳	۷۰	
	I _۴	۹۰	

پس از اجرای هر تیمار، لحظه خروج رواناب از هر یک از پلات‌های سه‌گانه با استفاده از زمان‌سنج ثبت و سپس

1- Spearman-Rho Correlation Coefficient

2- Kendall Correlation Coefficient

افزایش شدت بارندگی و رطوبت پیشین خاک موجب کاهش زمان شروع رواناب گردید اما میزان کاهش در مقادیر بالاتر شدت بارندگی و رطوبت خاک کمتر بود. به عبارت دیگر با افزایش شدت بارندگی و رطوبت پیشین خاک تغییرات زمان شروع رواناب کمتر شده و به تدریج به سمت عدد ثابت میل کرد (شکل ۲).

پیشین خاک بر زمان شروع رواناب با یافته‌های لی بیسونایس و همکاران (۱۹۹۵)، سیگر (۲۰۰۷) و روئیز سینوگا و همکاران (۲۰۱۰) همسو بوده و با یافته‌های آئرسوالد و همکاران (۱۹۹۴) مبنی بر اثر مستقیم رطوبت پیشین خاک بر زمان شروع رواناب و دفرشا و میلسه (۲۰۱۲) مبنی بر اثر معکوس رطوبت پیشین خاک بر ضریب رواناب در خاک با بافت سبک مغایرت دارد.

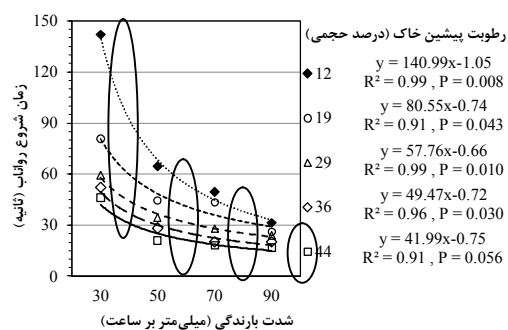
جدول ۲- زمان شروع و ضریب‌های رواناب در تیمارهای مختلف رطوبت پیشین خاک و شدت بارندگی

رطوبت پیشین خاک (درصد حجمی)					شماره پلات	شدت بارندگی
۴۴	۳۶	۲۹	۱۹	۱۲	(تکرار)	(میلی‌متر بر ساعت)
زمان شروع رواناب (ثانیه)						
۴۲/۴۸	۵۱/۴۸	۵۵/۴۶	۷۶/۴۹	۱۳۰/۲۳	۱	
۴۹/۹۳	۵۵/۹۳	۶۲/۳۰	۸۴/۶۲	۱۴۰/۴۶	۲	۳۰
۴۶/۴۲	۴۸/۴۲	۶۰/۶۰	۸۱/۲۵	۱۵۵/۰۷	۳	
۱۸/۰۹	۲۸/۴۷	۳۳/۱۰	۳۸/۴۹	۶۳/۸۶	۱	
۲۳/۸۱	۲۳/۱۴	۳۱/۵۰	۴۹/۵۱	۶۸/۸۶	۲	۵۰
۲۰/۶۶	۳۳/۳۲	۳۹/۲۰	۴۵/۲۵	۶۱/۰۳	۳	
۱۷/۷۷	۱۸/۵۰	۲۵/۳۷	۴۸/۵۶	۵۳/۲۳	۱	
۱۷/۱۱	۲۱/۵۹	۳۰/۴۹	۳۸/۳۹	۴۴/۳۹	۲	۷۰
۱۹/۲۶	۲۰/۸۲	۲۷/۲۴	۴۳/۳۹	۵۱/۱۱	۳	
۱۸/۰۳	۱۸/۳۶	۲۰/۳۶	۲۴/۰۶	۳۰/۵۱	۱	
۱۵/۲۷	۲۰/۷۴	۲۷/۵۳	۲۷/۴۸	۳۲/۲۹	۲	۹۰
۱۶/۸۶	۲۱/۵۰	۲۳/۷۹	۲۶/۵۹	۳۱/۲۶	۳	
ضریب رواناب (درصد)						
۸۵/۱۳	۸۴/۸۷	۷۱/۰۱	۵۹/۱۸	۴۴/۶۱	۱	
۹۱/۲۰	۸۲/۳۱	۷۰/۶۴	۵۸/۸۴	۵۱/۳۷	۲	۳۰
۸۰/۷۴	۷۴/۴۸	۶۴/۵۵	۶۱/۶۴	۴۱/۵۹	۳	
۹۷/۵۷	۸۵/۴۱	۷۶/۸۷	۶۷/۰۱	۵۷/۴۴	۱	
۹۱/۲۷	۸۷/۹۰	۷۷/۸۵	۶۲/۴۱	۴۸/۵۵	۲	۵۰
۹۲/۸۴	۸۷/۸۱	۷۳/۸۸	۶۳/۵۹	۵۲/۹۷	۳	
۸۹/۹۴	۱۰۰/۰۰	۹۳/۸۶	۸۶/۴۷	۶۲/۴۰	۱	
۱۰۰/۰۰	۸۸/۳۲	۸۳/۱۱	۷۸/۸۵	۷۰/۹۷	۲	۷۰
۹۸/۴۰	۹۸/۲۸	۸۸/۴۰	۸۱/۵۶	۶۴/۳۷	۳	
۱۰۰/۰۰	۹۹/۶۲	۹۴/۲۴	۸۶/۱۹	۷۲/۴۸	۱	
۱۰۰/۰۰	۹۴/۶۹	۸۸/۶۱	۸۱/۹۶	۶۹/۴۶	۲	۹۰
۱۰۰/۰۰	۹۷/۵۴	۹۰/۶۴	۸۳/۶۵	۶۸/۴۶	۳	

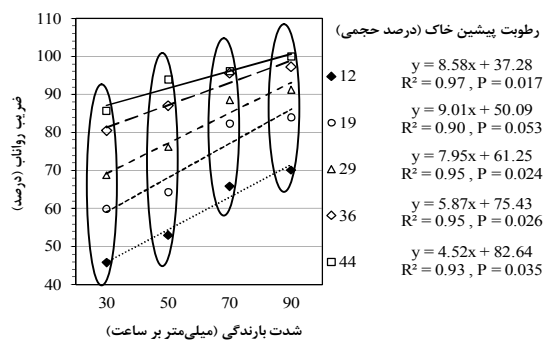
جدول ۳- ضریب‌های همبستگی اسپیرمن و کندال بین عوامل مورد بررسی

عوامل مورد بررسی	شدت بارندگی	رطوبت پیشین خاک	زمان شروع رواناب	ضریب رواناب
ضرایب همبستگی اسپیرمن	شدت بارندگی (میلی‌متر بر ساعت)	۱/۰۰۰		
	رطوبت پیشین خاک (درصد حجمی)	۰/۰۰۰	۱/۰۰۰	
	زمان شروع رواناب (ثانیه)	-۰/۷۰۹ ^{**}	-۰/۶۲۸ ^{**}	۱/۰۰۰
	ضریب رواناب (درصد)	۰/۵۱۷ ^{**}	۰/۸۰۴ ^{**}	-۰/۸۹۰ ^{**}
ضرایب همبستگی کندال	شدت بارندگی (میلی‌متر بر ساعت)	۱/۰۰۰		
	رطوبت پیشین خاک (درصد حجمی)	۰/۰۰۰	۱/۰۰۰	
	زمان شروع رواناب (ثانیه)	-۰/۵۵۵ ^{**}	-۰/۵۰۴ ^{**}	۱/۰۰۰
	ضریب رواناب (درصد)	۰/۴۰۱ ^{**}	۰/۶۴۷ ^{**}	-۰/۷۳۳ ^{**}

^{**} و ^{*} به ترتیب همبستگی معنی‌دار در سطح یک و پنج درصد



شکل ۲- رابطه شدت بارندگی و رطوبت پیشین خاک با زمان شروع رواناب



شکل ۳- رابطه شدت بارندگی و رطوبت پیشین خاک با ضریب رواناب

رابطه رطوبت پیشین خاک با زمان شروع و ضریب رواناب به‌ترتیب معکوس و مستقیم بود که با نتایج ارشم و همکاران (۱۳۸۸) و آتروسوالد و همکاران (۱۹۹۴) مبنی بر رابطه مستقیم رطوبت پیشین خاک با مقدار رواناب همسو است. هاوکه و همکاران (۲۰۰۶)، سیگر (۲۰۰۷) و دفرشا و ملسه (۲۰۱۲) به تفکیک سطوح تیمارهای مورد بررسی

از طرف دیگر با افزایش شدت بارندگی و رطوبت پیشین خاک میزان افزایش ضریب رواناب کاهش یافت (شکل ۳). بنابراین نتایج ضمن تأیید اثر متقابل از نوع هم‌زدایی^۱ نشان داد که رطوبت پیشین خاک در مقادیر کمتر شدت بارندگی بر زمان شروع رواناب مؤثرتر بوده و نیز اثر شدت بارندگی نیز بر زمان شروع رواناب در مقادیر کمتر رطوبت پیشین خاک بیشتر می‌شود (شکل ۲). این یافته‌ها با نتایج هاوکه و همکاران (۲۰۰۶) مبنی بر وقوع حالت نزدیک به اشباع در سطح خاک در ۱۰ دقیقه نخست از شدت‌های بارندگی زیاد و کاهش نفوذپذیری و وقوع زود هنگام زمان شروع رواناب و افزایش مقدار رواناب همسو می‌باشد در حالی که اثر متقابل شدت بارندگی و رطوبت پیشین خاک بر ضریب رواناب معنی‌دار نیست. به‌عبارت دیگر روند اثر رطوبت پیشین خاک بر ضریب رواناب با افزایش یا کاهش شدت بارندگی ثابت بوده است (شکل ۳).

بررسی نوع روابط نیز نشان می‌دهد که رابطه شدت بارندگی با زمان شروع و ضریب رواناب به‌ترتیب توانی-معکوس (شکل ۲) و خطی-مستقیم (شکل ۳) است. این یافته حاکی از پیچیدگی زمانی پاسخ هیدرولوژیکی در دقایق نخست رویداد بارندگی است و با نتایج آرنائز و همکاران (۲۰۰۷) مبنی بر وجود رابطه خطی-مستقیم بین شدت بارندگی و رواناب همسو است. بنابراین در مجموع می‌توان گفت در پژوهش حاضر، تغییرات پاسخ زمانی (زمان شروع رواناب) در شدت‌های مورد بررسی غیرخطی بوده اما ضریب رواناب با تغییر شدت بارندگی رفتاری تقریباً خطی از خود نشان داد.

پژوهش‌های قبلی (حدود ۳۰ میلی‌متر بر ساعت) ممکن است به دو دلیل بافت خاک سبک‌تر (شنی لومی) و شرایط آزمایشگاهی پژوهش به وجود آمده باشد. تفکیک سطوح تیمار رطوبت پیشین خاک نیز به گروه‌های همگن انجام شد و نشان داد که شیب تغییرات زمان شروع رواناب از سطوح رطوبتی ۱۲ تا ۴۴ درصد به تدریج کمتر می‌شود و به همین دلیل در زیرگروه‌های دارای اثرات همگن سطوح رطوبتی مشترک دیده می‌شود اما سطح رطوبتی ۱۲ درصد (خاک کاملاً خشک) به تنهایی در یک زیرگروه قرار گرفته و دارای پاسخی نسبتاً متفاوت است. از طرف دیگر آهنگ تغییر ضریب رواناب در رطوبت‌های مختلف از یکنواختی نسبی برخوردار بوده و فقط سطوح رطوبتی ۳۶ و ۴۴ درصد در زیرگروه مشابهی قرار گرفتند و می‌توان شیب تغییرات ضریب رواناب در رطوبت‌های بالا کمتر شده است.

نتیجه‌گیری

براساس نتایج این پژوهش همبستگی شدت بارندگی و رطوبت پیشین خاک با زمان شروع و ضریب رواناب معنی‌دار و به‌ترتیب معکوس و مستقیم بوده است. نتایج همچنین نشان دهنده اثر متقابل معنی‌دار از نوع هم‌زدایی بین شدت بارندگی و رطوبت پیشین خاک بر زمان شروع رواناب بوده در حالی‌که این اثر بر ضریب رواناب معنی‌دار نبوده است.

نتایج همچنین نشان دهنده تغییرات غیریکنواخت پاسخ هیدرولوژیکی خاک در سطوح مختلف شدت بارندگی و رطوبت پیشین خاک بودند به طوری که در شدت‌های بارندگی حد فاصل ۳۰ و ۵۰ و حد فاصل ۵۰ و ۷۰ میلی‌متر بر ساعت به‌ترتیب برای زمان شروع و ضریب رواناب، تغییر معنی‌داری در پاسخ هیدرولوژیکی خاک دیده شد. این حالت برای زمان شروع رواناب در حد فاصل سطوح رطوبت پیشین خاک ۱۲ تا ۱۹ درصد نیز رخ داد در حالی‌که در مورد ضریب رواناب روند تغییرات در سطوح رطوبت پیشین خاک به‌نسبت ثابت بوده و نقطه عطف محسوسی در روند تغییرات ضریب رواناب قابل تشخیص نبود.

با توجه به نتایج این پژوهش پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های مشابه آزمایشگاهی در خاک‌های با بافت سنگین و با ساختمان‌های متفاوت انجام شده و در نهایت پژوهش‌های

فقط در بحث استدلالی خود پرداخته‌اند، اما در پژوهش حاضر به‌دلیل مناسب و متناسب بودن تعداد سطوح مورد بررسی تیمارها، امکان تفکیک سطوح تیمارها به گروه‌های همگن با استفاده از آزمون‌های آماری و تعیین دقیق‌تر سطوح تغییرات پاسخ هیدرولوژیکی مهیا شده است. جدول ۴ نتایج تفکیک سطوح تیمارها به گروه‌های همگن با استفاده از آزمون دانکن^۱ را نشان می‌دهد.

نتایج تفکیک سطوح تیمارها به گروه‌های همگن نشان داد که مقادیر شدت بارندگی ۵۰، ۷۰ و ۹۰ میلی‌متر بر ساعت در یک زیرگروه همگن قرار گرفته و به‌عبارت دیگر دارای روند اثر تقریباً یکنواخت در زمان شروع رواناب بودند حال آنکه شدت بارندگی ۳۰ میلی‌متر رفتار متفاوتی از خود نشان داد. بنابراین می‌توان گفت نقطه عطف پاسخ زمانی هیدرولوژیکی خاک به شدت بارندگی عددی بین ۳۰ و ۵۰ است.

در مورد ضریب رواناب شدت‌های ۳۰ و ۵۰ در یک زیرگروه و شدت‌های ۷۰ و ۹۰ در زیرگروه دیگر قرار گرفتند و شیب تغییرات ضریب رواناب در حد فاصل شدت‌های ۵۰ و ۷۰ به طور معنی‌داری بیشتر بود.

به‌عبارت دیگر در شرایط خاک مورد بررسی در پژوهش حاضر، پاسخ هیدرولوژیکی در شدت‌های بارندگی حدود ۴۰ و ۶۰ میلی‌متر بر ساعت به‌ترتیب از لحاظ زمانی و مقداری به طور معنی‌داری تغییر می‌کند.

جدول ۴- تفکیک سطوح تیمارها به گروه‌های همگن با استفاده از آزمون دانکن ($\alpha = 0.05$)

گروه	تعداد و گروه‌بندی در عوامل تأثیرپذیر			گروه
	گروه ۱	گروه ۲	گروه ۳	
زمان شروع رواناب (ثانیه)	۳۰	۵۰، ۷۰، ۹۰	-	رطوبت پیشین (درصد)
	۳۰ و ۵۰	۷۰ و ۹۰	-	
ضریب رواناب (درصد)	۱۲	۱۹، ۲۹، ۳۶	۳۶ و ۴۴	رطوبت پیشین (درصد)
	۱۲ و ۱۹	۲۹	۳۶ و ۴۴	

اختلاف سطوح شدت بارندگی برای تغییر معنی‌دار پاسخ هیدرولوژیکی رواناب در پژوهش حاضر با یافته‌های برخی

^۱Duncan

- Dynamics of Interrill Erosion during Soil Surface Sealing. *Catena*. 66:211-220.
8. 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*. 93:324-334.
 9. Auerswald K. Mutchler C. K. and McGregor K. C. 1994. The Influence of Tillage-Induced Differences in Surface Moisture Content on Soil Erosion. *Soil and Tillage Research*. 32:41-50.
 10. Cammeraat E. L. H. 2004. Scale Dependent Thresholds in Hydrological and Erosion Response of A Semi-Arid Catchment in Southeast Spain. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 104:317-332.
 11. 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*. 284:114-130.
 12. Darboux F. Davy Ph. Gascuel-Oudou C. and Huang C. 2001. Evolution of Soil Surface Roughness and Flowpath Connectivity in Overland Flow Experiments. *Catena*. 46:125-139.
 13. Defersha M. B. and Mellese A. M. 2012. Effect of Rainfall Intensity, Slope and Antecedent Moisture Content on Sediment Concentration and Sediment Enrichment Ratio. *Catena*. 90:47-52.
 14. Defersha M. B. Quraishi S. and Mellese A. M. 2011. The Effect of Slope Steepness and Antecedent Moisture Content on Interrill Erosion, Runoff and Sediment Size Distribution in the Highlands of Ethiopia. *Hydrology and Earth System Sciences*. 15:2367-2375.
 15. Ekwue E. I. 1991. The Effects of Soil Organic Matter Content, Rainfall Duration and Aggregate Size on Soil Detachment. *Soil Technology*. 4:197-207.
 16. 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*. 65:237-246.
 17. Kukal S. S. and Sarkar M. 2010. Splash Erosion and Infiltration in relation to Mulching and Polyvinyl Alcohol Application in Semi-Arid Tropics. *Archives of Agronomy and Soil Science*. 56(6):697-705.
 18. Kukal S. S. and Sarkar M. 2011. Laboratory Simulation Studies on Splash Erosion and Crusting in Relation to Surface Roughness and Raindrop Size. *Journal of the Indian Society of Soil Science*. 59(1):87-93.
 19. Le Bissonnais Y. Renaux B. and Delouche H. 1995. Interactions between Soil Properties and Moisture Content in Crust Formation, Runoff and Interrill Erosion from Tilled Loess Soils. کامل‌تر در مقیاس‌های بزرگ‌تر و شرایط طبیعی خاک (دامنه و حوزه آبخیز تک منبع) به منظور مطالعه اثر مقیاس بر فرآیندهای مورد مطالعه انجام شود. نتایج حاصل، به‌ویژه پس از تلفیق با نتایج پژوهش در مقیاس‌های صحرایی در منطقه مادری خاک، می‌تواند به‌عنوان ابزاری سودمند در تعیین زمان‌های بحرانی در تولید رواناب در ماه‌های مختلف سال (با توجه به رطوبت پیشین خاک و امکان وقوع شدت‌های مختلف بارندگی) و تدوین برنامه‌های مدیریتی برای ایجاد تأخیر در شروع رواناب و کمینه‌سازی ضریب رواناب در جهت کاهش سیل‌خیزی و فرسایش خاک مورد استفاده قرار گیرد.
- ### منابع
۱. ارشم.ع. آخوندعلی.ع.م. و بهنیا.ع. ۱۳۸۸. بررسی اثر رطوبت‌های قبلی خاک بر مقادیر رواناب و رسوب با استفاده از باران شبیه‌سازی شده. فصلنامه علمی پژوهشی تحقیقات مرتع و بیابان ایران. ۱۶(۴):۴۴۵-۴۵۵.
 ۲. شریفی.ف. صفارپور.ش. ایوب‌زاده.س.ع. و وکیل‌پور.ج. ۱۳۸۳. بررسی عامل‌های مؤثر در تعیین آستانه شروع رواناب در مناطق خشک و نیمه‌خشک کشور به کمک استفاده از شبیه‌سازی و داده‌های بارش-رواناب. منابع طبیعی ایران. ۵۷(۱):۳۳-۴۵.
 ۳. صادقی.س.ح. ر. محمدپور.ک. و دیانتی‌تیلکی.ق.ع. ۱۳۸۹. تغییرپذیری زمانی ضریب رواناب در مراتع بیلاقی کدیر. چکیده مقالات ششمین همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری، ۸ و ۹ اردیبهشت ۱۳۸۹، نور، ایران. ص ۵۲.
 ۴. محمدپور.ک. ۱۳۸۸. مقایسه نفوذپذیری، تولید رواناب و رسوب، پستی و بلندی خرد و پوشش گیاهی در مراتع بیلاقی چرا و قرق شده نوشهر. پایان‌نامه کارشناسی ارشد مرتعداری. دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تربیت مدرس. ۸۱ ص.
 ۵. وهابی.ج. و مهدیان.م.ح. ۱۳۸۸. بررسی تأثیر پارامترهای ادافیکی بر مقدار رواناب با استفاده از شبیه‌ساز باران. پژوهش‌های آبخیزداری. ۸۳: ۱۰-۲۰.
 6. Agassi M. and Bradford J. M. 1999. Methodologies for Interrill Soil erosion Studies. *Soil and Tillage Research*. 49:277-287.
 7. Assouline S. and Ben-Hur M. 2006. Effects of Rainfall Intensity and Slope Gradient on the

- Catena. 25:33-46.
20. Luk S. H. 1985. Effect of Antecedent Soil Moisture Content on Rainwash Erosion. *Catena*. 12:129-139.
 21. Parsons A. J. and Stone P. M. 2006. Effects of Intra-Storm Variations in Rainfall Intensity on Interrill Runoff and Erosion. *Catena*. 67:68-78.
 22. Ruiz-Sinoga J. D. Romero Diaz A. FerreBueno E. and Martinez Murillo J. F. 2010. The Role of Soil Surface Conditions in Regulating Runoff and Erosion Processes on a Metamorphic Hillslope (Southern Spain), Soil Surface Conditions, Runoff and Erosion in SouthernSpain. *Catena*. 80:131-139.
 23. Seeger M. 2007. Uncertainty of Factors Determining Runoff and Erosion Processes As Quantified By Rainfall Simulations. *Catena*. 71:56-67.
 24. Tramblay Y. Bouvier C. Martin C. Didon-Lescot J. F. Todorovik D. and Domergue J. M. 2010. Assessment of Initial Soil Moisture Conditions for Event-Based Rainfall-Runoff Modeling. *Journal of Hydrology*. 387:176-187.

