

تأثیر شدت بارش و شیب در زمان شروع رواناب خاک لوم‌شنی با استفاده از دستگاه شبیه‌ساز باران (مطالعه موردی: شهر سمنان)

حمیدرضا قزوینیان و حجت کرمی^{۱*}

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۳/۱۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۶/۷)

چکیده

رواناب با سپری شدن مدت زمانی پس از بارندگی شکل گرفته و تا حد زیادی وابسته به شدت بارندگی، رطوبت خاک و شیب است. یکی از سؤال‌های اساسی در مورد رواناب، زمان شروع ایجاد آن است. در این پژوهش با کمک دستگاه شبیه‌ساز بارش به بررسی آزمایشگاهی زمان شروع رواناب در خاک لوم‌شنی در شرایط مختلف پرداخته شد. پارامترهای شدت بارش (۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ میلی‌متر بر ساعت) و شیب (۰ و ۵ درصد) مورد ارزیابی قرار گرفتند. بارندگی بر روی سه نوع تیمار خاک کاملاً خشک (S_{dry})، خاک خشکی که ۲۴ ساعت قبل از آزمایش اشباع شده (S_{24hr}lag) و خاک خشکی که ۴۸ ساعت قبل از آزمایش اشباع شده (S_{48hr}lag) ایجاد شد. در مجموع ۱۸ آزمایش روی این خاک انجام شد. در پایان هر آزمایش، رطوبت خاک اندازه‌گیری شد. نتایج آزمایشگاهی با مدل عددی گرین-آمپت مقایسه شد. با توجه به نتایج آزمون همبستگی کندال و اسپیرمن هر چه شدت بارش بیشتر باشد، زمان شروع رواناب کمتر است. همچنین، در شیب ۵ درصد برای هر سه نوع وضعیت خاک شروع رواناب در زمان سریع‌تری ایجاد می‌شود. همچنین، نتایج زمان شروع رواناب در خاک با ۴۸ ساعت تأخیر در بارش نسبت به خاک با ۲۴ ساعت تأخیر در بارش به خاک با ۲۴ ساعت تأخیر در بارش به حالت خاک خشک در تمامی شدت بارش‌ها و شیب‌ها نزدیک‌تر است. بنابراین، می‌توان این تحلیل را داشت که در آزمایش‌های مربوط به ۲۴ ساعت تأخیر، زمان شروع رواناب کاهش پیدا می‌کند. در حالی که در آزمایش‌های با ۴۸ ساعت تأخیر تفاوت زیادی با خاک کاملاً خشک نداشت. همچنین، نتایج روش گرین-آمپت با نتایج آزمایشگاهی نزدیک به هم است ($R^2=0.9775$) و حداکثر اختلاف ۴/۸ دقیقه‌ای بین دو روش مذکور وجود دارد. پس می‌توان با روش گرین-آمپت برای محاسبه زمان شروع رواناب در خاک لوم‌شنی در حالت‌های مختلف شدت بارش و شیب بستر استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: زمان آغاز رواناب، خاک لوم‌شنی، مدل گرین-آمپت، شبیه‌ساز بارش

۱. گروه مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: Hkarami@semnan.ac.ir

مقدمه

شدت بارش، تندی شیب و رطوبت پیشین خاک از مهم‌ترین عوامل فیزیکی و اقلیمی هستند که اثر یک جانبه و متقابل آن‌ها، کنترل‌کننده پاسخ هیدرولوژیکی آبخیز به رویداد بارندگی است. رواناب با سپری شدن مدت زمانی پس از بارندگی شکل گرفته و تا مقدار زیادی وابسته به ویژگی‌های بارش، خاک و شیب است. شدت بیشتر بارش و کاهش ظرفیت آب‌گیری لایه‌های سطحی خاک موجب افزایش حجم رواناب شده و در ادامه نیروی بیشتری برای کنش و انتقال ذرات خاک ایجاد می‌شود. هرچند اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر زمان شروع و ضریب رواناب تا حد زیادی به مقیاس مورد بررسی وابسته است (۲). اما صرف نظر از اولویت، مجموعه این عوامل در مقیاس حوزه آبخیز و پلات تفاوت زیادی با یکدیگر ندارند و در مجموع می‌توان گفت ویژگی‌های بارش، شرایط خاک، پوشش گیاهی و شیب در تمامی مقیاس‌ها از جمله مهم‌ترین عوامل مؤثر بر زمان تشکیل و ضریب رواناب هستند (۲۷). پوشش گیاهی مختلف اثرهای متفاوتی بر زمان شروع رواناب دارند. نوع پوشش گیاهی بر تولید رواناب سطحی تأثیر می‌گذارد و رواناب سطحی می‌تواند در مدت زمان کوتاهی در زمین‌های کشاورزی و مراتع تخریب شده ایجاد شود (۳۲). از سوی دیگر آگاهی از زمان شروع و ضریب رواناب و شناخت عامل‌های مؤثر بر آن نیز برای ارائه راهکار مدیریتی منجر به ایجاد تأخیر در وقوع و کاهش مقدار رواناب ضروری است. اهمیت رطوبت پیشین خاک تا حدی است که در بارش‌های با دوره بازگشت‌های کمتر از ۱۵ سال می‌تواند رواناب را به طرز کاملاً معنی‌داری تحت تأثیر قرار دهد (۳). اگرچه افزایش شدت بارش 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 (۲۵). صرف نظر از موارد گفته شده، امکان اثر متقابل شدت بارش و رطوبت پیشین خاک بر نفوذ و رواناب نیز بر اهمیت بررسی آنها می‌افزاید. واعظی و بهتری (۲۹) به ارزیابی تأثیر مقدار رطوبت اولیه خاک بر تولید رواناب با

استفاده از شبیه‌ساز باران پرداختند و نتیجه گرفتند که تفاوت معنی‌داری از نظر مقدار رواناب بین خاک‌های مطالعاتی در سطح یک درصد وجود داشت که این موضوع متأثر از مقدار رطوبت اولیه در خاک‌ها بود. شریفی و همکاران (۲۷) عوامل مؤثر بر تعیین زمان شروع رواناب در مناطق خشک و نیمه‌خشک کشور با استفاده از شبیه‌سازی و داده‌های بارش رواناب را بررسی کردند. در این مطالعه از یک باران‌ساز قابل حمل استفاده شد. نتایج حاکی از همبستگی ۳۱ درصدی آستانه شروع رواناب پیش‌بینی شده به‌وسیله مدل پیشنهادی با آستانه شروع رواناب اندازه‌گیری شده است.

ماتیس (۲۳) در بررسی میزان رواناب در مارن‌های فرانسه با استفاده از یک دستگاه شبیه‌ساز باران به این نتیجه رسید که در شدت متوسط و تداوم ۳۰ دقیقه بارش، ضریب رواناب در حدود ۰/۲ تا ۰/۵ است. آرنیز (۱) با استفاده از یک دستگاه باران‌ساز عوامل مؤثر بر ایجاد رواناب را در مارن‌های فرانسه مورد بررسی قرار داد و به این نتیجه رسید که میزان رواناب با شدت بارش رابطه‌نمایی دارد. دفرشا و ملسه (۶) به بررسی اثر شدت بارش با مقادیر ۵۵، ۷۰ و ۱۲۰ میلی‌متر بر ساعت در شیب‌های ۹، ۲۵ و ۴۵ درصد بر میزان رواناب پرداختند. این پژوهشگران مشاهده کردند که شدت بارش تأثیر معنی‌داری بر ضریب رواناب ندارد درحالی‌که شیب و نوع خاک بر ضریب رواناب اثر معنی‌داری دارند. یوسفی و همکاران (۳۳) اثر شیب و شدت بارش بر رواناب را بررسی و مشاهده کردند که با افزایش شدت بارش از ۵۵ به ۱۱۴ میلی‌متر بر ساعت، میزان رواناب به طرز قابل ملاحظه‌ای افزایش پیدا خواهد کرد.

ابراهیمی و همکاران (۹) با استفاده از شبیه‌ساز باران در کرت‌های صحرایی نشان دادند که عمق و شدت بارندگی به‌عنوان عوامل اقلیمی، پوشش گیاهی و شیب به‌عنوان عوامل زمین و بافت سنی و رسی نیز به‌عنوان عوامل خاک‌شناسی، متغیرهایی مؤثر در تعیین زمان شروع رواناب هستند. مو و همکاران (۲۴) با بررسی اثرات شدت بارش با مقادیر ۰/۶۷، ۱ و ۱/۶۷ میلی‌متر بر ساعت و شیب‌های ۹، ۲۷ و ۳۶ درصد به این

نیز حائز اهمیت است. همچنین پس از آگاهی از آستانه شروع رواناب در هر منطقه با استفاده از روش‌های مناسب، می‌توان برای کاهش حجم سیلاب‌ها، کاهش هزینه خسارات سیل و فرسایش و استفاده بهتر از نزولات برنامه‌ریزی کرد. به علت مطالعات اندک روی زمان شروع رواناب در خاک لوم‌شنی در منطقه کویری مانند شهر سمنان، در این پژوهش به بررسی آزمایشگاهی زمان آغاز رواناب در شدت بارش‌ها و شیب‌های مختلف پرداخته شد. همچنین، تحلیل‌های آماری پارامترهای اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه صورت گرفت و تأثیر آنها در تعیین آستانه شروع رواناب محاسبه شد. بر همین اساس، در راستای تعیین و تحلیل نسبی نقاط عطف پاسخ هیدرولوژیکی خاک، درصدد بررسی سطح‌های کامل‌تری از تیمارهای رطوبت خاک و شدت بارندگی برآمده و اثر متقابل عامل‌های مذکور و نوع روابط در حالت‌های مختلف بررسی شده است. در ادامه نتایج آزمایشگاهی با مدل گرین-آمپت مقایسه شد و مشابهت آستانه شروع رواناب مدل آزمایشگاهی با مقادیر شبیه‌سازی شده ارزیابی شد.

روش آزمایش

این پژوهش در محیط آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه سمنان واقع در شهر سمنان انجام شد. در مطالعه آزمایشگاهی از دستگاه شبیه‌ساز باران استفاده شد. در این مطالعه از یک نوع بافت خاک استفاده شده است. بافت خاک مورد نظر، لوم‌شنی در نظر گرفته شد. علت استفاده از این خاک، طبق پژوهش دهقانی و همکاران (۷) این بود که اکثر بافت خاک مناطق کشاورزی شهر سمنان را این نوع خاک پوشش می‌دهد. در جدول ۱ ترکیب بافت خاک نشان داده شده است. آزمایش زمان شروع رواناب با ایجاد بارش با کمک دستگاه شبیه‌ساز باران روی تیمارهای خاک لوم‌شنی صورت گرفت. به این منظور سه نوع خاک کاملاً خشک، خاک اشباع‌شده از آزمایش قبل ولی با ۲۴ ساعت تأخیر و خاک اشباع‌شده از آزمایش قبل ولی با ۴۸ ساعت تأخیر مورد آزمایش قرار گرفتند. عمق خاک‌های مورد

نتیجه رسیدند که با افزایش شدت بارش و درجه شیب، ضریب رواناب افزایش می‌یابد. سانتوس و همکاران (۲۶) اثرات خصوصیات ۱۷۶ واقعه بارندگی شامل شدت، مدت و فراوانی بر رواناب در سه حوزه آبخیز برزیل تحت کاربری‌های مختلف را بررسی کردند. این پژوهشگران بیان کردند که رژیم بارش بر تغییرات رواناب سطح تأثیر زیادی دارد. ژانگ و همکاران (۳۴) در یک مطالعه میدانی، به بررسی زمان شروع رواناب برای شش قطعه مختلف پرداختند و اثرات شدت بارندگی، رطوبت سطحی خاک در عمق ۵-۰ سانتی‌متری مشاهده کردند. در تیمارهای مورد بررسی دریافتند که رطوبت خاک و شدت بارندگی از عوامل تأثیرگذار بر شروع رواناب بخصوص برای روی خاک لخت هستند. همچنین، در یک نتیجه‌گیری کلی بیان کردند اقدامات حفاظتی خاک و آب می‌تواند منجر به بهبود زمان شروع رواناب و کاهش فرسایش رواناب در زمین‌های کشاورزی باشد. یانگ و همکاران (۳۱) با ترکیب کردن خاک لوم‌سیلتی با کاه گندم در زمین کشاورزی به بررسی میزان رواناب و زمان شروع رواناب پرداختند. تیمارها در ۳ شدت بارش ۸۰، ۱۲۰ و ۱۶۰ میلی‌متر بر ساعت و سه شیب مختلف ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج این آزمایش نشان داد که هرچه شدت بارش افزایش یابد زمان شروع رواناب کاهش می‌یابد. همچنین، ترکیب خاک لوم‌سیلتی با کاه گندم می‌تواند زمان شروع رواناب را به تأخیر بیانندازد. فانگ و همکاران (۱۱) به مقایسه نسبت‌های آب باران تبدیل شده به رواناب سطحی و زیرزمینی و همچنین زمان شروع رواناب اولیه برای سنگ بستر با شکاف و سنگ بستر بدون شکاف با شرایط مختلف شدت بارش و شیب پرداختند. در مرحله اولیه شروع رواناب، برای هر دو تیمار سنگ بستر با شکاف و سنگ بستر بدون شکاف با افزایش زمان بارندگی افزایش یافت.

برآورد دقیق‌تر آستانه شروع رواناب نه تنها می‌تواند منجر به کاهش هزینه‌های ایمن‌سازی و خسارت سیل می‌شود، بلکه در استفاده بهینه و مدیریت نزولات جوی و مسائل زیست‌محیطی

جدول ۱. درصد ذرات تشکیل دهنده خاک

بافت خاک	درصد رس	درصد سیلت	درصد شن
لوم شنی	۴	۱۹	۷۷

همکاران (۲۸) انتخاب شدند.

در ارتفاع ۳۰ سانتی متری از کف حوضچه‌ها لوله‌ای به منظور خروج رواناب تشکیل شده بر روی تیمار مورد مطالعه قرار گرفته است. جت‌های بارش در ارتفاع ۲/۵ متری از سطح حوضچه تیمارها قرار گرفته‌اند. این جت‌ها قابلیت تغییر ارتفاع، تغییر زاویه و تغییر در فاصله از هم را دارند. این دستگاه قابلیت تغییر شدت بارش از ۲۰ میلی متر بر ساعت تا ۲۲۰ میلی متر بر ساعت را دارا است. دستگاه دارای پمپ و مخزن بوده و آب درون مخزن از طریق پمپاژ به جت‌ها وارد می‌شوند. شدت بارش با کمک روتامتر دستگاه و با شیرهای موجود تنظیم دبی تغییر می‌کردند. شکل ۲ تصویر دستگاه شبیه‌ساز بارش را نشان می‌دهد.

روش گرین- آمپت در تعیین زمان شروع رواناب

این مدل، یکی از مدل‌های مفهومی است که براساس قانون دارسی و رابطه پیوستگی معادلات آن تدوین شده است. در این مدل سرعت نفوذ و میزان نفوذ تجمعی از روابط ۲ و ۳ به دست می‌آید (۵ و ۱۰):

$$f(t) = k \left(1 + \frac{\psi \Delta \theta}{F(t)} \right) \quad (2)$$

$$\Delta \theta = \eta - \theta t \quad (3)$$

$F(t)$: مقدار نفوذ تجمعی برحسب سانتی متر، k : هدایت هیدرولیکی بر حسب سانتی متر بر ساعت، Ψ : مکش خاک در ناحیه مرطوب بر حسب سانتی متر، $\Delta \theta$: اختلاف درصد رطوبت اولیه و درجه پوکی، t : زمان از شروع بارندگی برحسب دقیقه، η : درجه پوکی، θ : درجه شیب و $f(t)$: سرعت نفوذ برحسب سانتی متر بر ساعت است. زمان شروع رواناب در مدل گرین- آمپت زمانی است که مقدار $f(t)$ با $F(t)$ برابر یا بزرگتر باشد.

آزمایش ۳۰ سانتی متر در نظر گرفته شد. آزمایش‌ها در سه تیمار کاملاً مشابه به منظور ۳ بار تکرار انجام شد. شکل ۱ خاک مورد استفاده در آزمایش در حالت کاملاً خشک و اشیاع بعد از ایجاد رواناب را نشان می‌دهد. آزمایش‌های مربوط به رطوبت خاک در آزمایشگاه مکانیک خاک دانشکده مهندسی عمران انجام شد. رطوبت خاک با کمک کوره‌ای که در آزمایشگاه مذکور وجود داشت و براساس رابطه (۱) محاسبه شد. در جدول ۲ تیمارهای مورد آزمایش در شدت بارش، شیب و وضعیت خاک بیان شده است. براساس این جدول در مجموع ۱۸ آزمایش انجام شده است. شدت بارش‌ها بر اساس نمودار IDF شهر سمنان و تحقیقات کاویان و همکاران (۲۰)، سلیمانی و همکاران (۲۸) و ژانگ و همکاران (۳۴) تعیین شدند.

$$\omega(\%) = \frac{W_1 - W_2}{W_2 - W_3} \times 100 \quad (1)$$

ω درصد رطوبت

W_1 = وزن نمونه خاک مرطوب با ظرف

W_2 = وزن نمونه خاک خشک با ظرف

W_3 = وزن ظرف

دستگاه شبیه‌ساز بارش

دستگاه شبیه‌ساز باران، دارای ۲ جت بارش است. این دستگاه دارای تشت (حوضچه) است که تیمارهای آزمایش (در این پژوهش خاک لوم‌شنی) قرار می‌گیرد. این حوضچه‌ها قابلیت تغییر شیب را از صفر تا ۱۵ درصد دارند. حوضچه‌ها خود در ارتفاع ۷۰ سانتی بالاتر از سطح زمین و بر روی پایه‌های فلزی واقع شده‌اند. جنس حوضچه از ورق آهن گالوانیزه است. ابعاد حوضچه‌ها ۱ × ۱ متر و دارای ارتفاع ۵۰ سانتی متر است. این ابعاد براساس پژوهش‌های لیو و همکاران (۲۲) و سلیمانی و



ب



الف

شکل ۱. خاک مورد آزمایش، الف) خاک کاملاً خشک و ب) خاک اشباع (رنگی در نسخه الکترونیکی)

جدول ۲. تیمارهای مورد آزمایش

۶۰	شدت بارش (میلی متر بر ساعت)
۸۰	
۱۰۰	
۰	شیب (%)
۵	
کاملاً خشک	وضعیت خاک
مرطوب (بعد از ۲۴ ساعت اشباع شدن)	
مرطوب (بعد از ۴۸ ساعت اشباع شدن)	



شکل ۲. ساختار کلی دستگاه شبیه ساز باران (رنگی در نسخه الکترونیکی)

معیار ارزیابی

ANOVA پرداخته شده است.

جهت ارزیابی نتایج آزمایشگاهی و مدل گرین-آمپت از شاخص آماری ضریب تبیین (R^2) (۱۳)، ریشه‌ی میانگین مربعات خطا (RMSE) (۱۷) و میانگین خطای مطلق (MAE) (۱۹) استفاده شد (روابط ۴ تا ۶). شاخص R^2 هرچه به یک نزدیکتر باشد، مطابقت بین داده‌ها بهتر است (۸). همچنین شاخص‌های RMSE و MAE به صفر نزدیک شوند، عملکرد داده‌های آزمایشگاهی و مدل گرین-آمپت مناسب تر است (۱۴).

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (۴)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{N}} \quad (۵)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n |(y_i - x_i)| \quad (۶)$$

x_i مقدار اندازه‌گیری‌شده زمان شروع رواناب در آزمایشگاه، y_i مقدار برآورد شده زمان شروع رواناب در مدل گرین-آمپت، \bar{x} میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده زمان شروع رواناب و \bar{y} میانگین نظیر برای مقادیر برآورد شده است (۱۲).

تحلیل آماری

به منظور تحلیل آماری پس از ثبت نتایج اندازه‌گیری داده‌های مربوط به پوشش‌ها، مقادیر حاصل شده پارامترهای دخیل در آزمایشگاه با استفاده از نرم افزار SPSS21 مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند (۱۵ و ۱۶). آزمون همبستگی کندال و اسپیرمن بین داده‌های شدت بارش، شیب، وضعیت خاک در برابر بارش، رطوبت خاک و زمان شروع رواناب مورد بررسی قرار گرفتند. در ادامه با کمک آزمون دانکن، حالت‌های مختلف وضعیت خاک در برابر بارش ارزیابی شده است. رگرسیون داده‌های شدت بارش، شیب و رطوبت خاک در برابر زمان شروع رواناب بررسی شد. در نهایت به آنالیز واریانس داده‌های شدت بارش با زمان شروع رواناب و رطوبت خاک با کمک آزمون

نتایج و بحث

این پژوهش با هدف بررسی اثرات یک جانبه و متقابل شدت بارندگی، شیب بر رطوبت خاک و زمان شروع رواناب انجام شد. در جدول ۳ رابطه بین شدت بارش‌های ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ میلی‌متر بر ساعت در شیب‌های صفر و ۵ درصد با زمان شروع رواناب در تیمارهای مختلف را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که هر چه شدت بارش بیشتر باشد، زمان شروع رواناب کمتر است. همچنین، در شیب ۵ درصد برای هر سه نوع وضعیت خاک شروع رواناب در زمان سریع‌تری ایجاد می‌شود. همچنین نتایج زمان شروع رواناب در خاک با ۴۸ ساعت تأخیر در بارش نسبت به خاک با ۲۴ ساعت تأخیر در بارش به حالت خاک خشک در تمامی شدت بارش‌ها و شیب‌ها نزدیک‌تر است. در جدول ۳ زمان شروع رواناب به روش گرین-آمپت نیز ارائه شده است. بطور کلی نتایج این روش با نتایج آزمایشگاهی نزدیک به هم است و حداکثر اختلاف ۴/۸ دقیقه بین دو روش مذکور وجود دارد.

در جدول ۴ میزان رطوبت خاک در برابر شیب و بارش‌های مختلف تا زمان شروع رواناب نشان داده شده است. طبیعی است میزان رطوبت خاک در تمامی شدت بارش‌ها و شیب‌ها در حالت خاک خشک بعد از بارش نسبت به حالت ۲۴ و ۴۸ ساعت تأخیر کمتر باشد. همچنین، با مقایسه وضعیت خاک در برابر بارش‌های مختلف می‌توان نتیجه گرفت که میزان رطوبت خاک شیب صفر درصد بیشتر از شیب ۵ درصد در همان وضعیت متناظر است. رطوبت بالای خاک به معنی ظرفیت نفوذ کم است. لی و همکاران (۲۱) بیان کردند که شدت بارندگی زیاد باعث افزایش رطوبت خاک، کاهش سرعت نفوذ و شروع رواناب نسبتاً سریع برای خاک می‌شود. رواناب زمانی رخ می‌دهد که شدت بارندگی از نرخ نفوذ خاک بیشتر شود (۱۸).

در شکل ۳ نمودار هیستوگرام اختلاف بین روش

جدول ۳. زمان شروع رواناب در شرایط مختلف

شیب (%)	وضعیت خاک در برابر بارش	شدت بارش (mm/hr)	زمان شروع رواناب آزمایشگاهی (min)	زمان شروع رواناب روشن-آمپیت (min)
		۶۰	۵۵/۲	۵۳/۵
	خاک خشک	۸۰	۳۱/۸	۲۹/۲
		۱۰۰	۱۸/۱	۱۸
		۶۰	۲۹/۵	۳۳/۱
صفر	خاک با ۲۴ ساعت تأخیر	۸۰	۱۲/۳	۱۵/۱
		۱۰۰	۶/۲	۱۱
		۶۰	۴۷/۵	۴۳/۷
	خاک با ۴۸ ساعت تأخیر	۸۰	۲۴/۳	۲۲
		۱۰۰	۱۳/۴	۱۴/۳
		۶۰	۴۹/۸	۴۷/۴
	خاک خشک	۸۰	۲۸/۷	۲۶/۳
		۱۰۰	۱۵/۲	۱۳
		۶۰	۲۶/۷	۲۸/۲
۵	خاک با ۲۴ ساعت تأخیر	۸۰	۱۰/۵	۸
		۱۰۰	۵/۵	۷/۶
		۶۰	۴۳/۴	۴۰/۴
	خاک با ۴۸ ساعت تأخیر	۸۰	۲۰/۱	۱۸/۷
		۱۰۰	۱۰/۱	۱۲

جدول ۴. درصد رطوبت بعد از بارش در شرایط مختلف

شیب (%)	وضعیت خاک در برابر بارش	شدت بارش (mm/hr)	رطوبت (%)
		۶۰	۲۶/۷۱
	خاک خشک	۸۰	۳۰/۲۶
		۱۰۰	۳۵/۱۱
		۶۰	۳۷/۳۹
صفر	خاک با ۲۴ ساعت تأخیر	۸۰	۴۰/۰۳
		۱۰۰	۴۵/۱۱
		۶۰	۲۹/۱۶
	خاک با ۴۸ ساعت تأخیر	۸۰	۳۳/۷۱
		۱۰۰	۳۶/۵۴

ادامه جدول ۴

رطوبت (%)	شدت بارش (mm/hr)	وضعیت خاک در برابر بارش	شیب (%)
۲۵/۷۱	۶۰		
۲۹/۳۱	۸۰	خاک خشک	
۳۳/۱۲	۱۰۰		
۳۴/۴۳	۶۰		
۳۸/۱۱	۸۰	خاک با ۲۴ ساعت تأخیر	۵
۴۴/۱۲	۱۰۰		
۲۷/۱۲	۶۰		
۳۲/۸۱	۸۰	خاک با ۴۸ ساعت تأخیر	
۳۵/۳۲	۱۰۰		

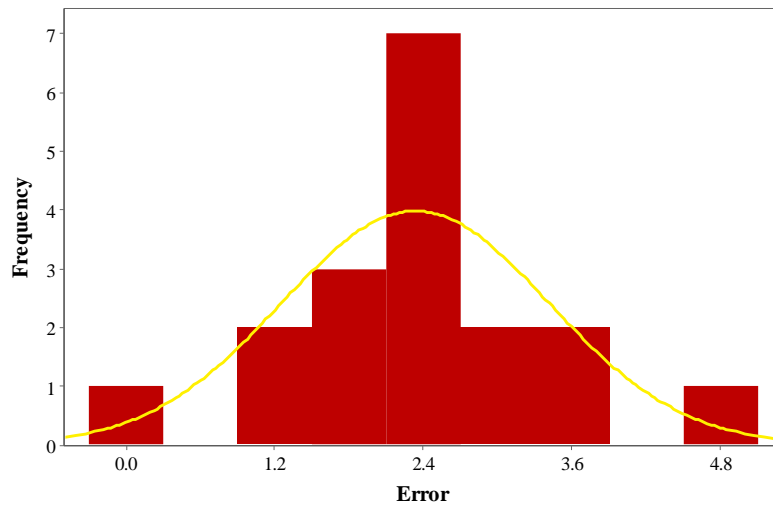
برخوردار است. مقادیر MAE و RMSE به ترتیب ۱/۰۱۲۱ و ۱/۹۱۲۱ محاسبه شد.

شکل ۵ نمودار پراکنش یا منحنی پراکنندگی مقادیر زمان شروع رواناب در آزمایشگاه در برابر مقادیر روش گرین-آمپت نمایش داده شده است. همان طور که در شکل مشخص است، اختلاف بین دو روش زیاد ناست.

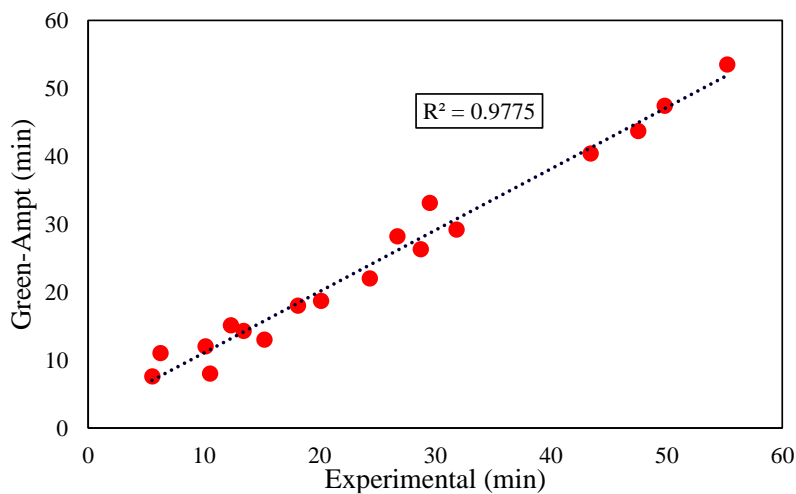
شکل ۶ رابطه بین رطوبت خاک پس از بارش در آزمایشگاه با زمان شروع رواناب بصورت مشاهداتی و مدل گرین-آمپت در تمامی حالت‌های مورد بررسی را نشان می‌دهد. در هر دو حالت رابطه عکس بین رطوبت خاک و زمان شروع بارش وجود دارد. یعنی هرچه رطوبت خاک بیشتر شود، رواناب در زمان کمتری ایجاد می‌شود. ضریب همبستگی در رطوبت خاک با مدل آزمایشگاهی و مدل گرین-آمپت به ترتیب حدود ۰/۷۴ و ۰/۶۴ است. مقادیر MAE و RMSE به ترتیب ۴/۰۲۶۱ و ۴/۹۵۶۱ محاسبه شد.

در جدول ۵ نتایج آزمون همبستگی کندال و اسپیرمن بین داده‌های شدت بارش، شیب، وضعیت خاک در برابر بارش، رطوبت خاک و زمان شروع رواناب نمایش داده شده است. در آزمون کندال با توجه به کمتر بودن مقدار ضریب معناداری از ۰/۰۵ ($\alpha < 0.05$) می‌توان گفت که بین متغیر شدت بارش و زمان شروع رواناب ارتباط معناداری وجود دارد. از طرفی مقدار

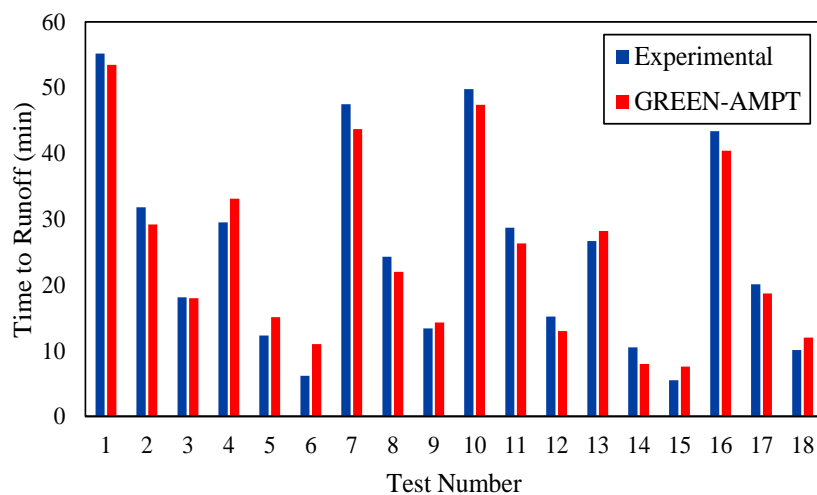
آزمایشگاهی و مدل گرین-آمپت در زمان شروع رواناب نمایش داده شده است. این نمودار برای تمامی شرایط مورد مطالعه رسم شده است. این شکل نشان می‌دهد حدود ۴۰ درصد از اختلاف داده‌های آزمایشگاهی زمان شروع رواناب با داده‌های مدل گرین-آمپت ۲/۴ دقیقه است. بهترین توزیع اختلاف داده‌های زمان شروع رواناب آزمایشگاهی و مدل گرین-آمپت، توزیع Wakeby با $\chi = 0.286$ و $(k-s)=0.078$ انتخاب شد. کمترین اختلاف ۰/۱ دقیقه، برای زمانی است که شیب صفر درصد و شدت بارش ۱۰۰ میلی‌متر بر ساعت و خاک کاملاً خشک است. همچنین، بیشترین اختلاف زمانی برای زمانی است که شیب صفر و شدت بارش ۱۰۰ میلی‌متر بر ساعت و با تأخیر ۲۴ ساعته در آزمایشگاه رواناب ایجاد شده است. مقدار بیشترین اختلاف ۴/۸ دقیقه است. شکل ۴ نمودار زمان شروع رواناب در دو مدل آزمایشگاهی و گرین-آمپت را برای تمامی حالت‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد. نمودار افقی داده‌های آزمایشگاهی (برحسب دقیقه) و محور عمودی، داده‌های برآورد شده براساس روش گرین-آمپت را نشان می‌دهد. هرچه پراکنندگی داده‌ها در اطراف بهترین خط برازش کمتر باشد، همبستگی بیشتر و خطای کمتری حاصل می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود، همبستگی بین داده‌ها ۰/۹۷۷۵ است که نشان می‌دهد نتایج مدل آزمایشگاهی از دقت بالایی



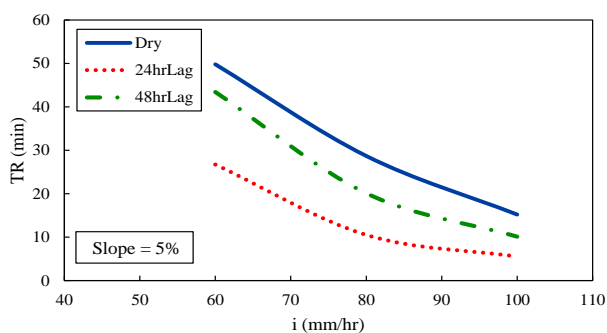
شکل ۳. هیستوگرام اختلاف داده‌های آزمایشگاهی با روش گرین-آمپت (رنگی در نسخه الکترونیکی)



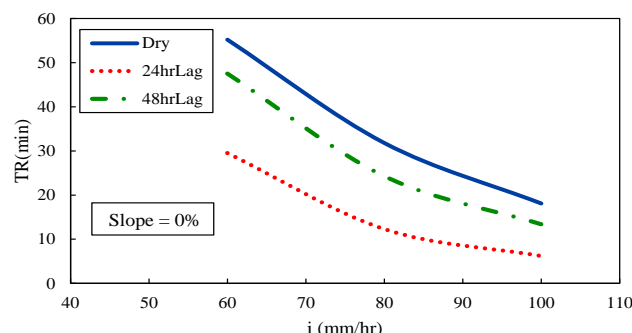
شکل ۴. مقادیر زمان شروع رواناب در مدل آزمایشگاهی در برابر مدل گرین-آمپت (رنگی در نسخه الکترونیکی)



شکل ۵. منحنی پراکندگی مقادیر زمان شروع رواناب در آزمایشگاه و مدل گرین-آمپت (رنگی در نسخه الکترونیکی)



ب



الف

شکل ۶. نمودار شدت بارش در برابر زمان شروع رواناب برای وضعیت مختلف خاک الف: زمان شروع رواناب و شیب صفر، ب: زمان شروع رواناب و شیب ۵ درصد (رنگی در نسخه الکترونیکی)

در جدول ۸ بررسی شیب تیمارهای آزمایش با زمان شروع رواناب و رطوبت پرداخته شده است. آزمون T مستقل برای یافتن اختلاف بین دو گروه آماری متغیر شیب (صفر و ۵ درصد) انجام گرفت. دو فرض صفر و یک در نظر گرفته شد. فرض صفر، بین دو گروه شیب صفر و شیب ۵ درصد اختلاف معناداری وجود ندارد و فرض یک، بین دو گروه شیب صفر و شیب ۵ درصد اختلاف معناداری وجود دارد. بر این اساس با توجه جدول ۸ فرض صفر رد نمی‌شود.

در جدول ۹ به بررسی شدت بارش با زمان شروع رواناب و رطوبت خاک با کمک آزمون ANOVA پرداخته شده است. دو فرض در نظر گرفته شده است. فرض صفر، بین گروه‌های متغیر شدت بارش با متغیرهای زمان شروع رواناب و رطوبت اختلاف معنادار وجود ندارد و فرض یک، بین گروه‌های متغیر شدت بارش با متغیرهای زمان شروع رواناب و رطوبت اختلاف معنادار وجود دارد. با توجه به اینکه مقدار ضریب معنادار در دو حالت بیشتر از ۰/۰۵ است، می‌توان گفت که فرض صفر پذیرفته می‌شود. در شکل ۶ ارتباط بین شدت بارش‌های ایجاد شده با زمان شروع رواناب و رطوبت خاک در حالت خاک خشک، خاک با ۲۴ ساعت تأخیر و خاک با ۴۸ ساعت تأخیر در دو شیب صفر و ۵ درصد نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در هر دو شیب صفر و ۵ درصد هرچه شدت بارش بیشتر می‌شود، زمان شروع رواناب در هر سه حالت وضعیت خاک کمتر می‌شود. همچنین، در هر دو شیب مورد

ضریب کندال منفی ست به این معنا که هر چه شدت بارش افزایش پیدا کند، زمان شروع رواناب کاهش پیدا می‌کند. همچنین، آزمون ضریب همبستگی اسپیرمن نیز نشان می‌دهد که میان متغیر شدت بارش و زمان شروع رواناب آزمایشگاهی ارتباط معناداری وجود دارد. ضریب اسپیرمن ۰/۴۸۵- است که از نظر شدت متوسط بوده و از نظر جهت ارتباط منفی است. در نتیجه هر چه شدت بارش افزایش پیدا می‌کند، زمان شروع رواناب کاهش می‌یابد. این نتیجه با تحقیقات لی و همکاران (۲۱)، ژو و گاوین (۳۰) و ژانگ و همکاران (۳۴) مطابقت دارد. جدول ۶ نتایج آزمون دانکن برای حالت وضعیت خاک در برابر بارش را نشان می‌دهد. این جدول نشان می‌دهد که در سطح معناداری ۰/۰۵ رابطه‌ای بین خاک خشک، خاک با ۲۴ ساعت تأخیر و خاک با ۴۸ ساعت تأخیر ندارد. بنابراین، نمی‌توان گروه داده‌های وضعیت خاک در برابر بارش را گروه‌بندی کرد.

جدول ۷ نتایج رگرسیونی داده‌های شدت بارش، شیب و رطوبت خاک در برابر زمان شروع رواناب را نشان می‌دهد. با توجه به میزان معناداری هر یک از متغیرهای مستقل می‌توان گفت که فقط متغیر شدت بارش می‌تواند دارای رابطه خطی با متغیر زمان شروع رواناب باشد. بنابراین، رابطه خطی ۷ می‌تواند را تعریف کرد که i شدت بارش برحسب mm/hr و TR زمان شروع رواناب است.

$$\text{TR} = -0.07i + 10.659 \quad (7)$$

$$(R^2 = 0.921, \text{MAE} = 2.142 \text{ and } \text{RMSE} = 2.567)$$

جدول ۵. نتایج آزمون همبستگی کندال و اسپیرمن بر روی متغیرهای تعیین شده و اندازه‌گیری شده

شیب (%)	ضریب همبستگی	شیب (%)	وضعیت خاک برابر بارش	شدت بارش (mm/hr)	زمان شروع رواناب (min)	رطوبت (%)
Kendall's tau_b	شیب (%)	ضریب همبستگی	۱/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۱۱۷	۰/۰۴۵
	Sig. (2-tailed)		۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۰/۵۶۶	۰/۸۲۵
	تعداد		۱۸	۱۸	۱۸	۱۸
وضعیت خاک در برابر بارش	ضریب همبستگی	۰/۰۰۰	۱/۰۰۰	۰/۰۰۰	-۰/۲۰۲	۰/۱۵۶
	Sig. (2-tailed)		.	۱/۰۰۰	۰/۲۹۳	۰/۴۱۹
	تعداد		۱۸	۱۸	۱۸	۱۸
شدت بارش (mm/hr)	ضریب همبستگی	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۱/۰۰۰	-۰/۳۸۹*	-۰/۲۳۳
	Sig. (2-tailed)		۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۰/۰۴۳	۰/۲۲۵
	تعداد		۱۸	۱۸	۱۸	۱۸
رطوبت (%)	ضریب همبستگی	۰/۱۱۷	-۰/۲۰۲	-۰/۳۸۹*	۱/۰۰۰	۰/۰۷۲
	Sig. (2-tailed)		۰/۵۶۶	۰/۲۹۳	۰/۰۴۳	۰/۶۷۷
	تعداد		۱۸	۱۸	۱۸	۱۸
Spearman's rho	شیب (%)	ضریب همبستگی	۱/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۱۳۹	۰/۰۵۴
	Sig. (2-tailed)		.	۱/۰۰۰	۰/۵۸۲	۰/۸۳۳
	تعداد		۱۸	۱۸	۱۸	۱۸
وضعیت خاک در برابر بارش	ضریب همبستگی	۰/۰۰۰	۱/۰۰۰	۰/۰۰۰	-۰/۲۳۶	۰/۱۹۷
	Sig. (2-tailed)		.	۱/۰۰۰	۰/۳۴۶	۰/۴۳۴
	تعداد		۱۸	۱۸	۱۸	۱۸
شدت بارش (mm/hr)	ضریب همبستگی	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۱/۰۰۰	-۰/۴۸۵*	-۰/۳۲۸
	Sig. (2-tailed)		۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۰/۰۴۱	۰/۱۸۴
	تعداد		۱۸	۱۸	۱۸	۱۸
رطوبت (%)	ضریب همبستگی	۰/۱۳۹	۰/۲۳۶	-۰/۴۸۵*	۱/۰۰۰	۰/۱۰۰
	Sig. (2-tailed)		۰/۵۸۲	۰/۳۴۶	۰/۰۴۱	۰/۶۹۳
	تعداد		۱۸	۱۸	۱۸	۱۸

جدول ۶. نتایج آزمون دانکن برای وضعیت خاک در برابر بارش

Duncan*		
alpha = 0.05		
۱	تعداد	وضعیت خاک در برابر بارش
۳/۲۶۱۷	۶	خاک با ۴۸ ساعت تأخیر
۴/۸۱۱۷	۶	خاک با ۲۴ ساعت تأخیر
۴/۹۹۳۳	۶	خاک کاملاً خشک
۰/۲۵۷		Sig.

میانگین گروه‌ها در زیرمجموعه‌های همگن نمایش داده می‌شود.

* از میانگین اندازه نمونه هارمونیک استفاده می‌کند = ۶

جدول ۷. نتایج رگرسیونی پارامترهای تعریف‌شده در آزمایشگاه در برابر زمان شروع رواناب

Coefficients ^a					
ضرایب استاندارد شده			ضرایب غیر استاندارد		
Sig.	t	Beta	Std. Error	B	مدل
۰/۰۰۵	۳/۳۷۵		۳/۱۵۸	۱۰/۶۵۹	وضعیت خاک در برابر بارش
۰/۴۹۵	۰/۷۰۱	۰/۱۵۸	۰/۲۱۱	۰/۱۴۸	(%) شیب
۰/۰۴۰	-۲/۲۶۰	-۰/۵۴۰	۰/۰۳۴	-۰/۰۷۷	شدت بارش (mm/hr)
۰/۵۳۱	-۰/۶۴۳	-۰/۱۵۴	۰/۰۲۲	-۰/۰۱۴	(%) رطوبت

a متغیر وابسته: زمان شروع رواناب آزمایشگاهی (min)

یکی از پژوهش‌های مهم در این زمینه، تعیین زمان شروع رواناب در یک حوضه است. تعیین زمان شروع رواناب در مدیریت پاسخ حوضه‌های آبخیز در برابر بارندگی از متغیرهای کلیدی در مدیریت سامانه آبخیز هستند. در این پژوهش، نتایج نشان داد که افزایش شیب و افزایش شدت بارش در محیط آزمایشگاه، می‌تواند بر زمان شروع رواناب تأثیرگذار باشد و مقدار این زمان را کاهش دهد. همچنین، انجام آزمایش مشابه بر روی خاک بعد از ۲۴ و ۴۸ ساعت تأخیر می‌تواند در زمان شروع رواناب اثرگذار باشد و در آزمایش‌های مربوط به ۲۴ ساعت تأخیر، زمان شروع رواناب کاهش پیدا می‌کند. درحالی که در آزمایش با ۴۸ ساعت تأخیر تفاوت زیادی با خاک کاملاً

بررسی و در سه وضعیت خاک مورد مطالعه هر چه شدت بارش بیشتر باشد درصد رطوبت خاک هم بیشتر می‌شود. این روند افزایش برای خاک خشک تقریباً خطی است. در یک پژوهش به نسبت مشابه، کاستیلو و گومز (۳) دریافتند که رطوبت اولیه خاک عامل اصلی تأثیرگذار بر رواناب است. با این حال، شدت بارندگی، نوع خاک و نوع پوشش گیاهی بر زمان شروع رواناب تأثیرگذار هستند (۴).

نتیجه‌گیری

استفاده از روش‌های مهار هدررفت خاک و کاهش رواناب همیشه مد نظر پژوهشگران مختلف در سراسر دنیا بوده است.

جدول ۸. نتایج آزمون نمونه‌های مستقل

95% Confidence Interval of the Difference		Std. Error Difference	Mean Difference	Sig. (2-tailed)	df	Sig.	F	آزمون لوین برای برابری واریانس‌ها	
حد بالا	حد پایین							آزمون t برای برابری میانگین‌ها	
۱/۷۱۱۵۱	-۳/۱۸۲۶۲	۱/۱۵۴۳۳	-۰/۷۳۵۵۶	۰/۵۳۳	۱۶	۰/۳۳۹	۰/۹۷۰	واریانس‌های برابر فرض شده است	زمان شروع رواناب آزمایشگاهی (min)
۱/۷۲۴۴۱	-۳/۱۹۵۵۲	۱/۱۵۴۳۳	-۰/۷۳۵۵۶	۰/۵۳۴	۱۵/۰۳۰			واریانس‌های برابر فرض نشده است	
۲۶/۱۱۹۵۲	-۲۶/۷۵۵۰۸	۱۲/۴۷۰۹۸	-۰/۳۱۷۷۸	۰/۹۸۰	۱۶	۰/۷۹۵	۰/۰۷۰	واریانس‌های برابر فرض شده است	رطوبت (%)
۲۶/۱۱۹۶۵	-۲۶/۷۵۵۲۱	۱۲/۴۷۰۹۸	-۰/۳۱۷۷۸	۰/۹۸۰	۱۵/۹۹۹			واریانس‌های برابر فرض نشده است	

جدول ۹: بررسی شدت بارش ایجاد شده در آزمایش با زمان شروع رواناب و رطوبت خاک

ANOVA					
Sig.	F	میانگین مربعات	df	مجموع مربعات	
۰/۱۱۴	۲/۵۱۸	۱۲/۳۶۲	۲	۲۴/۷۲۴	بین گروه‌ها
		۴/۹۱۰	۱۵	۷۳/۶۴۹	درون گروه‌ها
			۱۷	۹۸/۳۷۳	مجموع
۰/۳۹۷	۰/۹۸۲	۶۴۸/۳۶۵	۲	۱۲۹۶/۷۳۰	بین گروه‌ها
		۶۶۰/۱۰۴	۱۵	۹۹۰/۱۵۵۴	درون گروه‌ها
			۱۷	۱۱۱۹۸/۲۸۴	مجموع

حوضچه (کرت) در زمان شروع رواناب بررسی شود. آزمایش ها در شیب‌های تندتر (بالتر از ۵ درصد) انجام شود و همچنین شدت بارش‌های بالاتر از ۱۰۰ میلی‌متر بر ساعت و کمتر از ۶۰ میلی‌متر بر ساعت با زاویه‌های مختلف نیز بررسی شوند. با توجه به نتایج پژوهش حاضر پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های مشابه آزمایشگاهی در خاک‌هایی با بافت‌ها و ساختمان‌های مختلف انجام شده و همچنین در مقیاس‌های بزرگ‌تر و شرایط طبیعی خاک انجام بگیرد.

خشک نداشت. همچنین، با افزایش رطوبت خاک، زمان شروع رواناب کاهش پیدا کرد. بین متغیر شدت بارش و زمان شروع رواناب ارتباط معناداری وجود دارد. هر چه شدت بارش افزایش پیدا کند، زمان شروع رواناب کاهش می‌یابد. با مقایسه مدل آزمایشگاه با مدل گرین-آمیت، نتایج از همبستگی بالایی برخوردار هستند. از جمله محدودیت این پژوهش می‌توان به ثابت بودن طول کرت، عدم تغییر ارتفاع و زاویه بارش اشاره کرد. برای پژوهش‌های آینده پیشنهاد می‌شود تأثیر تغییر شکل

منابع مورد استفاده

1. Arnaez, J., T. Lasanta, P. Ruiz-Flano and L. Ortigosa. 2007. Factors affecting runoff and erosion under simulated rainfall in Mediterranean vineyards. *Soil and Tillage Research* 93(2): 324-334.
2. 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.
3. Castillo, V. M., A. Gomez-Plaza and M. Martinez-Mena. 2003. The role of antecedent soil water content in the runoff response of semiarid catchments: a simulation approach. *Journal of Hydrology* 284:114-130.
4. Chen, H. S., M. A. Shao, X. C. Zhang and K. L. Wang. 2005. Field experiment on hillslope rainfall infiltration and runoff under simulated rainfall conditions. *Journal of Soil and Water Conservation* 19: 5-8.
5. Chow, V. T., D. R. Maidment and W. Larry. 1988. *Applied Hydrology*. MacGraw-Hill Inc, 149.
6. Defersha, M. B. and A. M. Melesse. 2012. Effect of rainfall intensity, slope and antecedent moisture content on sediment concentration and sediment enrichment ratio. *Catena* 90: 47-52.
7. Dehghani, H., H. Haji Agha Bozorgi and A. A. Ghaemi. 2019. The Effect of different irrigation regimes under subsurface drip irrigation system on soil moisture distribution in Pistachio orchard. *Water Soil* 33: 391-404.
8. Dehghanipour, M. H., H. Karami, H. Ghazvinian, Z. Kalantari and A. H. Dehghanipour. 2021. Two comprehensive and practical methods for simulating pan evaporation under different climatic conditions in Iran. *Water* 13(20): 2814.
9. Ebrahimi, N., Gh. Eslami and F. Sharifi. 2013. Estimating runoff threshold using rain simulation in field Plots. *Journal of Watershed Engineering and Management* 7(2): 211-222 (In Farsi).
10. Fakhari Nikche, A., M. Vafakhah and S. H. R. Sadeghi. 2014. Efficiency evaluation of different infiltration models in different land uses and soil classes using rainfall simulator. *Water and Soil Science* 24(1): 183-193.
11. Fang, Q., L. Zhao, R. Hou, C. Fan and J. Zhang. 2022. Rainwater transformation to runoff and soil loss at the surface and belowground on soil-mantled karst slopes under rainfall simulation experiments. *Catena* 215: 106316.
12. Ghazvinian, H., H. Bahrami, H. Ghazvinian and S. Heddam. 2020. Simulation of monthly precipitation in semnan city using ANN artificial intelligence model. *Journal of Soft Computing in Civil Engineering* 4(4): 36-46.
13. Ghazvinian, H., H. Karami, S. Farzin and S. F. Mousavi. 2020. Effect of MDF-cover for water reservoir evaporation reduction, experimental, and soft computing approaches. *Journal of Soft Computing in Civil Engineering* 4(1): 98-110.
14. Ghazvinian, H., H. Karami, S. Farzin and S. F. Mousavi. 2020. Experimental study of evaporation reduction using polystyrene coating, wood and wax and its estimation by intelligent algorithms. *Irrigation and Water Engineering* 11(2): 147-165.
15. Ghazvinian, H., S. Farzin, H. Karami and S. F. Mousavi. 2020. Investigating the effect of using polystyrene sheets on evaporation reduction from water-storage reservoirs in arid and semiarid regions (Case study: Semnan city). *Journal of Water and Sustainable Development* 7(2): 45-52.
16. Ghazvinian, H., H. Karami, S. Farzin and S. F. Mousavi. 2022. Introducing affordable and accessible physical covers to reduce evaporation from agricultural water reservoirs and pools (field study, statistics, and intelligent methods). *Arabian Journal of Geosciences* 14(23): 2543.

17. Ghazvinian H., S. F. Mousavi, H. Karami, S. Farzin, M. Ehteram, M. S. Hossain, C. M. Fai, H. B. Hashim, V. P. Singh, F. C. Ros and A. N. Ahmed. 2019. Integrated support vector regression and an improved particle swarm optimization-based model for solar radiation prediction. *PLoS One* 14(5): e0217634.
18. Harmel, R. D., C. W. Richardson, K. W. King, P. M. Allen. 2006. Runoff and soil loss relationships for the Texas Blackl and Prairies ecoregion. *Journal of Hydrology* 331: 471-483.
19. Karami, H., H. Ghazvinian, M. H. Dehghanipour and M. Ferdosian. 2021. Investigating the performance of neural network based group method of data handling to pan's daily evaporation estimation (Case Study: Garmsar City). *Journal of Soft Computing in Civil Engineering* 5(2): 1-18.
20. Kavian, A., M. Mohammadi, M. Fallah and L. Gholami. 2016. Effect of wheat straw on changing time to runoff and runoff coefficient in laboratory plots under rainfall simulation. *Journal of Water and Soil Resources Conservation* 5(2): 73-82.
21. Li, X. Y., S. Contreras, A. Sole-Benet, Y. Canton, F. Domingo, R. Lazaro, H. Lin, B. V. Wesemael and J. Puigdefabregas. 2011. Controls of infiltration-runoff processes in Mediterranean karst rangelands in SE Spain. *Catena* 86: 98-109.
22. Liu, W., Q. Feng, W. Chen and R. C. Deo. 2020. Storm water runoff and pollution retention performances of permeable pavements and the effects of structural factors. *Environmental Science and Pollution Research* 27: 30831-30843.
23. Mathys, N. 2005. Runoff and erosion in the Black Marls of the French, Alps: observation and measurement at the plot scale. *Catena* 63: 261-281.
24. Mu, W., F. Yu, C. Li, Y. Xie, J. Tian, J. Liu and N. Zhao. 2015. Effects of rainfall intensity and slope gradient on runoff and soil moisture content on different growing stages of spring maize. *Water* 7(6): 2990-3008.
25. Parsons, A. J. and P. M. Stone. 2006. Effects of intra-storm variations in rainfall intensity on inter-rill runoff and erosion. *Catena* 67: 68-78.
26. Santos, J. C. N., E. M. Andrade, P. H. A. Medeiros, M. J. S. Guerreiro and H. A. Q. Palácio. 2017. Effect of rainfall characteristics on runoff and water erosion for different land uses in a tropical semiarid region. *Water Resources Management* 13(1): 173-185.
27. Sharifi, F., S. H. Safarpour, S. A. Ayoubzadeh and J. Vakilpourn. 2004. An Investigation of factors affecting runoff generation in arid and semi-arid area using simulation and rainfall runoff data. *Iranian Journal Natural Resources* 57(1): 33-45 (In Farsi).
28. Soleimani, F., A. Kavian, K. Solaimani, F. Sharifi and K. Shahedi. 2018. Effect of application of several amendments on threshold and coefficient of runoff in various conditions under rainfall simulation. *Watershed Engineering and Management* 10(2): 214-230.
29. Vaezi, A. R. and M. Behtari. 2018. The Effect of initial moisture on runoff generation and soil loss in different soil textures under simulated rainfall condition. *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering* 11(39): 11-21.
30. Xue, J. F. and K. Gavin. 2008. Effect of rainfall intensity on infiltration into partly saturated slopes. *Geotechnical and Geological Engineering* 26: 199-209.
31. Yang, J., H. Liu, T. Lei, A. E. Rahma, C. Liu and J. Zhang. 2021. Effect of straw-incorporation into farming soil layer on surface runoff under simulated rainfall. *Catena* 199:105082.
32. Yaşar Korkaç, S. 2018. Effects of the land use/cover on the surface runoff and soil loss in the Niğde-Akkaya Dam Watershed, Turkey. *Catena* 163: 233-243.
33. Yousefi, A., A. Farrokhian Firuzi and B. Khalil Moghaddam. 2013. Investigate the effect of rainfall intensity and duration on splash erosion using splash multivariate device. *In: 2nd National Conference on Sustainable Agricultural Development and Healthy Environment, Vocational Universities Hamadan Shahid Mofateh, (In Farsi)*.
34. Zhang, J., L. Zhou, R. Ma, Y. Jia, F. Yang, H. Zhou and X. Cao. 2019. Influence of soil moisture content and soil and water conservation measures on time to runoff initiation under different rainfall intensities. *Catena* 182:104172.

Effect of Rainfall Intensity and Slope at the Beginning of Sandy Loam Soil Runoff using Rain Simulator (Case Study: Semnan City)

H. R. Ghazvinian and H. Karami^{1*}

(Received: June 2-2022; Accepted: August 29-2022)

Abstract

Runoff is formed by spending some time after rain and significantly depends on rainfall intensity, soil moisture, and slope. One of the fundamental questions about runoff is the time that it starts to create. In this research, the runoff start time in sandy loam soil was evaluated experimentally under different conditions using a precipitation simulator machine. The rainfall intensity parameters of (60, 80, and 100 millimeters per hour) and the slope of (0 and 5 percent) were investigated. The rainfall was created in the three soil treatment types completely dry (S_{dry}), the dry soil that had been saturated 24 hours before the test ($S_{24hrlag}$), and the dry soil that had been saturated 48 hours before the test ($S_{48hrlag}$). Eighteen tests were conducted on this soil. At the end of each test, the soil moisture was measured. The experimental results were compared with the numerical model of Green-Ampt. According to the Kendall and Spearman correlation test results, as the rainfall be intense, the start time of the runoff is lower. Also, the runoff starts at a faster time in the slope of 5 percent for every three types of soil. Also, the results of starting time of the runoff in the soil with a delay of 48 hours in the rain compared to the soil with a delay of 24 hours in the rain are closer in all of the rainfall intensity and slopes compared to the case of dry soil. Therefore, in the experiments related to a delay of 24 hours, the time of the start of runoff decreases. While in tests with a delay of 48 hours, it was not much different from completely dry soil. Also, the Green-Ampt results are close to the experimental results ($R^2=0.9775$), and the maximum difference between the two mentioned methods is 4.8 minutes. Therefore, it can be used with the Green-Ampt method to calculate the start time of runoff in sandy loam soil in different states of rainfall intensity and bed slope.

Keywords: Runoff start time, Sandy loam soil, Green-Ampt model, Precipitation simulator

1. Department of Water Engineering and Hydraulic Structures, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

*: Corresponding author, Email: Hkarami@semnan.ac.ir