

کلید واژه: کرت فرسایشی با شیب قابل تنظیم؛ آتش تجویزی؛ شبیه‌ساز باران؛ رواناب؛ تولید رسوب؛ فرسایش خاک؛ مدیریت آبخیز

طراحی و ارزیابی عملکرد کرت فرسایشی با شیب قابل تنظیم تحت بارش شبیه‌سازی شده

کهزاد حیدری^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۵/۰۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۱۰

DOI: / 10.22034/WMI.2026.2095906.1144

چکیده

کرت‌های فرسایشی ثابت، بررسی کنترل‌شده اثر شیب را محدود می‌کنند. هدف پژوهش، معرفی کرت فرسایشی با شیب قابل تنظیم، ارزیابی کاربرد آن همراه با باران‌ساز دلتاب و مقایسه پاسخ هیدرو رسوبی سه کاربری در آبخیز توشن استان گلستان است. بارش با شدت ۸۰ میلی‌متر بر ساعت به مدت ۳۰ دقیقه روی کرت‌های سوخته کشاورزی، جنگل پهن‌برگ و جنگل سوزنی‌برگ (پنج تکرار برای هر کاربری) اعمال شد؛ ۳۰ درصد تنها شیب اندازه‌گیری شده بود و نتایج سایر شیب‌ها صرفاً پاسخ مهندسی وابسته به داده مبنا هستند. زمان شروع رواناب، رواناب و رسوب دوره‌ای، مقادیر کل و زمان رسیدن به ۵۰ درصد پاسخ جمعی محاسبه شد. برآوردهای مقاوم، بازه اطمینان بوت‌استرپ ۹۵ درصد، آزمون تصادفی‌سازی، اندازه اثر کلیف و تحلیل حذف یک کرت به کار رفت. میانه زمان شروع رواناب در کشاورزی، سوزنی‌برگ و پهن‌برگ به ترتیب ۱/۱۵، ۳، ۴/۳۷ دقیقه بود. میانه رسوب کل نیز به ترتیب ۱۱۴، ۴۸/۵ و ۶۲ گرم و غلظت رویدادی رسوب ۸/۹۹، ۳/۶۷ و ۵/۳۳ گرم بر لیتر به دست آمد؛ این الگوها در تحلیل پایداری حفظ شدند. شواهد کافی برای تفاوت رواناب کل مشاهده نشد. در تحلیل حساسیت مهندسی لنگر شده در شیب ۳۰ درصد، افزایش شیب به ۴۰ درصد با افزایش ۲۳/۶ درصدی رسوب، افزایش ۴/۳ درصدی رواناب و کاهش ۶/۸ درصدی زمان شروع همراه بود. سامانه، ابزار مناسبی برای آموزش، غربالگری شیب‌های بحرانی و طراحی آزمایش‌های فرسایش است.

مقدمه

آزمایش باران شبیه‌سازی شده امکان کنترل شدت و مدت بارش و مشاهده مستقیم پاسخ کرت را فراهم می‌کند؛ با این حال، کیفیت استنباط به یکنواختی مکانی بارش، فشار و نوع نازل، ارتفاع سقوط قطره، مساحت کرت و تکرارپذیری سامانه وابسته است. مقایسه ۱۳ باران‌ساز کوچک در اروپا دامنه گسترده‌ای از شدت، اندازه قطره، انرژی و ضریب یکنواختی را نشان داد و بر گزارش کامل مشخصات واسنجی تأکید کرد [۷]. بولانژ و همکاران [۲] و زمکه [۱۱] نیز نشان دادند که باران‌سازهای قابل حمل، در صورت واسنجی مناسب، برای مطالعه رواناب و انتقال رسوب در مقیاس کرت مفیدند؛ بنابراین، معرفی یک سامانه فقط با ذکر شدت اسمی بارش کامل نمی‌شود و باید آرایش اجزا، ابعاد کرت، روش تنظیم شیب و شاخص یکنواختی نیز گزارش شود.

شیب یکی از محرک‌های اصلی سرعت جریان، توان انتقال و جدایش ذرات است، اما اثر آن بر حجم رواناب لزوماً به اندازه اثر آن بر رسوب مستقیم و یکنواخت نیست. سامویل و همکاران [۱۰] در یک آزمایش میدانی پس از آتش نشان دادند که هم شدت سوختگی و هم افزایش شیب می‌تواند رواناب و فرسایش را افزایش دهند، هرچند اثر شدت سوختگی قوی‌تر بود. بروکر و همکاران [۳] نیز با تلفیق تیمارهای سوختگی، بارش و شیب در یک چارچوب آزمایشگاهی، ارزش کنترل هم‌زمان این محرک‌ها را برای جداسازی روابط علت و پاسخ نشان دادند. باوجود این، در بسیاری از آزمایش‌های داخلی از کرت‌هایی با شیب ثابت استفاده می‌شود؛ در نتیجه، تغییر شیب مستلزم جابه‌جایی خاک یا ساخت کرت جدید است و مقایسه شرایط همسان دشوار می‌شود.

آبخیز توشن در دامنه‌های شمالی البرز و در پهنه جنگل‌های هیرکانی قرار دارد و جنگل پهن‌برگ، جنگل دست‌کاشت سوزنی‌برگ و اراضی کشاورزی از کاربری‌های اصلی آن هستند. خاک‌های لسی، تغییر کاربری و ناهمگنی توپوگرافی، این آبخیز را به بستری مناسب برای مطالعه پاسخ‌های هیدرو رسوبی تبدیل کرده است. عجمی و همکاران [۱] نیز نقش کاربری و توپوگرافی را در تغییر ویژگی‌های خاک‌های لسی همین آبخیز نشان داده‌اند. توسعه یک کرت کوچک،

۱- استادیار پژوهشی بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات، آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اهواز، ایران. پست الکترونیکی: kohzad93@gmail.com و k.heidary@areeo.ac.ir

قابل حمل و قابل تنظیم می‌تواند افزون بر پژوهش، در آموزش کارشناسان، نمایش میدانی فرایندهای فرسایش و طراحی آزمایش‌های بعدی کاربرد داشته باشد.

بر این اساس، هدف‌های پژوهش عبارت بود از: (۱) تشریح طراحی و ساخت کرت فرسایشی با شیب قابل تنظیم و نحوه اتصال آن به شبیه‌ساز باران دلتالب؛ (۲) ارزیابی عملکرد سامانه با استفاده از یکنواختی بارش و بازسازی بدون خطای رواناب و رسوب دوره‌ای؛ (۳) مقایسه مقاوم پاسخ هیدرو رسوبی سه کاربری سوخته؛ و (۴) ارائه یک تحلیل حساسیت مهندسی، لنگر شده در داده اندازه‌گیری‌شده شیب ۳۰ درصد، برای شناسایی شیب‌های اولویت‌دار در آزمایش‌های آینده. در هدف چهارم، مقادیر سایر شیب‌ها به‌عنوان پاسخ مهندسی وابسته به داده مبنا تفسیر شدند و نه به‌عنوان تکرار آزمایشی مستقل.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه و برداشت خاک

آبخیز توشن یکی از زیرحوضه‌های قره‌سو در جنوب غرب گرگان، استان گلستان است و بین طول‌های شرقی ۵۴ درجه و ۲۴ دقیقه تا ۵۴ درجه و ۲۷ دقیقه و عرض‌های شمالی ۳۶ درجه و ۴۷ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۴۹ دقیقه قرار دارد. مساحت آبخیز حدود ۸۴۷ هکتار، دامنه ارتفاعی آن ۱۴۷ تا ۶۰۷ متر، میانگین بارش سالانه ۶۲۰ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه ۱۶ درجه سلسیوس است. سه کاربری کشاورزی، جنگل پهن برگ و جنگل دست‌کاشت سوزنی‌برگ که روی هم بخش عمده سطح آبخیز را تشکیل می‌دهند، برای پژوهش انتخاب شدند.

مکان‌های برداشت با طرح تصادفی-سیستماتیک و پس از هم‌پوشانی نقشه کاربری و مدل رقومی ارتفاع ۳۰ متری انتخاب شد. به‌منظور کاهش ناهمگنی توپوگرافی، نمونه‌ها از طبقه شیب میانی ۱۵ تا ۳۰ درصد برداشت شدند. خاک هر نقطه به‌طور جداگانه از لایه‌های صفر تا پنج و پنج تا ۱۵ سانتی‌متری برداشت، در دمای متوسط حدود ۲۷ درجه سلسیوس هوا خشک و از الک ۱/۵ میلی‌متری عبور داده شد. سپس خاک با حفظ ترتیب دولایه در کرت متناظر بازسازی شد. برای هر کاربری پنج تکرار در نظر گرفته شد.

شبیه‌ساز باران و واسنجی

برای ایجاد بارش کنترل‌شده از شبیه‌ساز باران تحت فشار دلتالب، طراحی‌شده توسط ORSTOM، استفاده شد. دستگاه از نازل جارویی رفت‌وبرگشتی، پایه فلزی، مخزن تغذیه، پمپ انتقال آب، شیر تنظیم، فشارسنج و برد الکترونیکی کنترل شدت و مدت بارش تشکیل شده بود. شدت بارش از طریق تغییر زاویه جاروب نازل تنظیم می‌شد؛ افزایش زاویه جاروب، زمان حضور نازل بر فراز سطح را کاهش می‌داد و شدت را کم‌تر می‌کرد. دامنه اسمی شدت قابل تولید دستگاه ۲۰ تا ۲۵۰ میلی‌متر بر ساعت بود.

نازل در فاصله عمودی دو متر از سطح واسنجی قرار گرفت و

فشار کاری ۰/۶ بار تنظیم شد. توزیع مکانی بارش با شبکه منظم ظروف جمع‌آوری در سطح ۲×۱ متر، طی سه نوبت ۱۰ دقیقه‌ای اندازه‌گیری شد. شدت از میانگین عمق آب جمع‌آوری‌شده و ضریب یکنواختی بر اساس روش کریستینسن [۴] محاسبه شد. ضریب یکنواختی بیش از ۸۶ درصد بود. پس از واسنجی، شدت ۸۰ میلی‌متر بر ساعت و تداوم ۳۰ دقیقه برای آزمایش اصلی انتخاب شد. مشخصات اصلی سامانه در جدول (۱) و آرایش اجزا و مسیر انتقال آب در شکل (۱) نشان داده شده است. تصویر آرایش واسنجی بارش در شکل (۳-ب) ارائه شده است.

جدول ۱: مشخصات فنی و اجرایی سامانه بارش شبیه‌سازی‌شده و کرت فرسایشی

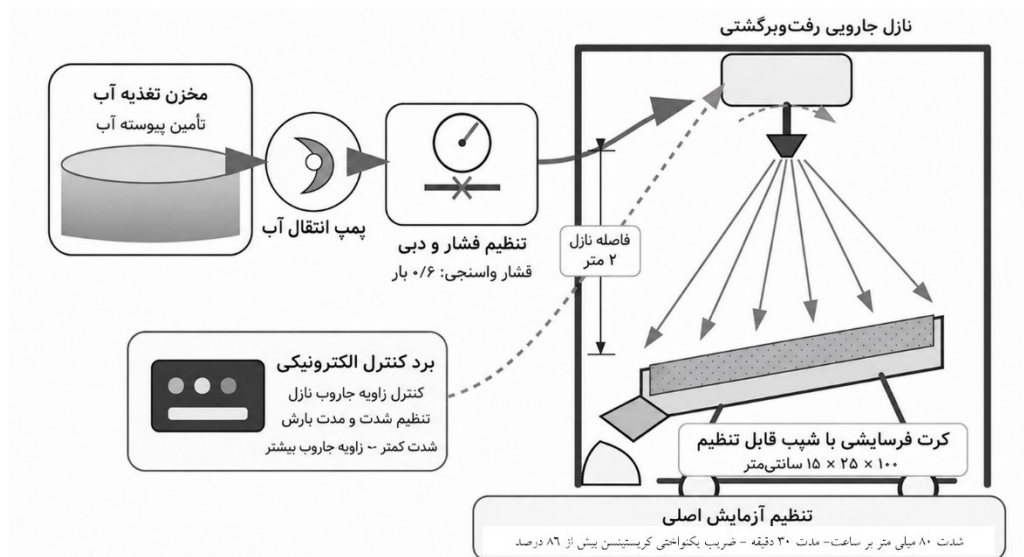
مؤلفه	مقدار یا مشخصه
نوع باران‌ساز	تحت فشار دلتالب با نازل جارویی رفت‌وبرگشتی
دامنه شدت اسمی	۲۰ تا ۲۵۰ میلی‌متر بر ساعت
فاصله نازل	۲ متر
فشار واسنجی	۰/۶ بار
تکرار واسنجی	سه نوبت ۱۰ دقیقه‌ای
ضریب یکنواختی	بیش از ۸۶ درصد
بارش آزمایش	۸۰ میلی‌متر بر ساعت به مدت ۳۰ دقیقه
بدنه کرت	۱۵×۳۵×۱۰۰ سانتی‌متر؛ ورق گالوانیزه ۱/۵ میلی‌متر

طراحی و ساخت کرت فرسایشی با شیب قابل تنظیم

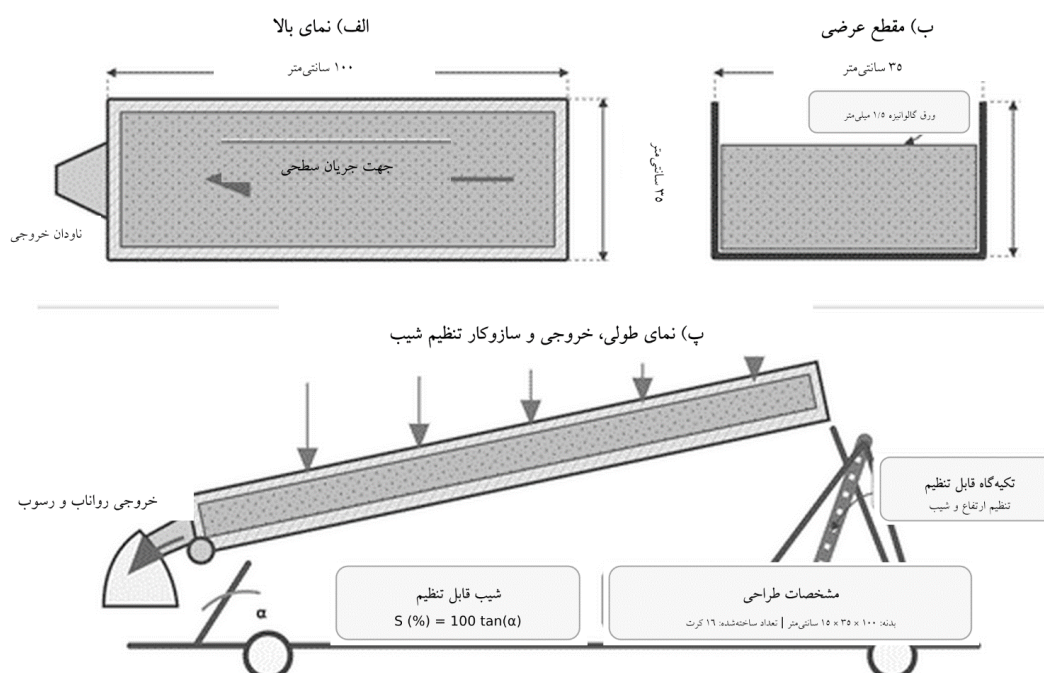
برای نگهداری خاک، اعمال آتش تجویزی و جمع‌آوری خروجی، ۱۶ کرت از ورق گالوانیزه با ضخامت ۱/۵ میلی‌متر ساخته شد. در این مقاله، «کرت فیزیکی» به سازه ساخته‌شده و «رکورد» به یک نوبت اجرای ثبت‌شده در داده‌نامه اشاره دارد؛ از این‌رو این دو عدد الزاماً برابر نیستند. داده مبنا ۱۹ رکورد داشت، اما استنباط مقایسه‌ای فقط بر ۱۵ رکورد مستقل تیمارهای سوخته (پنج رکورد برای هر کاربری) انجام شد و چهار رکورد شاهد صرفاً برای کنترل کیفیت و توصیف داده حفظ شدند. ابعاد هر کرت ۱۰۰ سانتی‌متر طول، ۳۵ سانتی‌متر عرض و ۱۵ سانتی‌متر ارتفاع و سطح افقی آن ۰/۳۵ مترمربع بود. در پایین‌دست، ناودان خروجی برای هدایت هم‌زمان رواناب و رسوب به ظرف نمونه‌برداری تعبیه شد. بدنه کرت روی شاسی متحرک دارای محور چرخش و تکیه‌گاه قابل تنظیم قرار گرفت تا تغییر و تثبیت شیب بدون تخلیه خاک امکان‌پذیر باشد. نمای کرت ساخته‌شده و شاسی تنظیم شیب در شکل (۳-الف) ارائه شده است.

$$S(\%) = 100 \times \tan(\alpha) \quad (1)$$

در رابطه ۱، S شیب کرت برحسب درصد و α زاویه سطح کرت نسبت به افق است. ابعاد بدنه و سازوکار مفهومی تنظیم شیب در شکل (۲) ارائه شده‌اند؛ ابعاد شاسی و ناودان در این شکل شماتیک و بدون مقیاس‌اند.



شکل ۱: اجزای اصلی شبیه ساز باران دلتالب، مسیر انتقال آب و استقرار کرت فرسایشی در زیر نازل.



شکل ۲: نقشه فنی کرت فرسایشی با شیب قابل تنظیم: (الف) نمای بالا و جهت خروج رواناب، (ب) مقطع عرضی و ابعاد بدنه و (پ) نمای طولی شاسی و سازوکار تنظیم شیب.

شاخص‌ها و آستانه‌های استاندارد طبقه‌بندی میدانی شدت سوختگی خاک در این آزمایش اندازه‌گیری نشد، برچسب‌های کیفی کلاس شدت سوختگی حذف و دمای ثبت شده تنها به عنوان شاخص توصیفی شدت حرارتی تیمار گزارش شد. مراحل پیش از آتش، حین آتش تجویزی و پس از خاموش شدن در شکل (۳-پ) مستند شده است. در داده مورد استفاده این پژوهش، بارش ۸۰ میلی متر بر ساعت به مدت ۳۰ دقیقه در شیب اندازه‌گیری شده ۳۰ درصد اعمال شد. زمان شروع رواناب از آغاز بارش تا مشاهده نخستین خروجی ثبت شد. نمونه‌های رواناب و رسوب در پنج بازه ۲-۰، ۷-۲، ۱۲-۷،

آتش تجویزی و اجرای بارش پس از بازسازی خاک، بقایای گیاهی متناظر با هر کاربری روی کرت قرار گرفت. سوخت جنگل پهن برگ از سرشاخه بلوط و مرمرز، سوخت جنگل سوزنی برگ از کاج و سوخت کشاورزی از بقایای گندم تشکیل شد. ارتفاع توده سوخت تا حدود ۳۰ سانتی متر بالاتر از لبه کرت تنظیم و اشتعال اولیه با مشعل گازی انجام شد. دمای سطح با دماسنج لیزری در فاصله‌های دو دقیقه‌ای ثبت شد. میانگین دمای سطح ثبت شده در جنگل سوزنی برگ، جنگل پهن برگ و کشاورزی به ترتیب ۲۸۰، ۲۵۳ و ۱۷۰ درجه سلسیوس بود. چون

تحلیل آماری پاسخ‌های اندازه‌گیری‌شده

به دلیل تعداد کم تکرارها و احتمال توزیع غیرنرمال، میانه، دامنه بین چارکی و بازه اطمینان ۹۵ درصد بوت‌استرپ با ۲۰۰۰۰ باز نمونه گزارش شد. هر جا محاسبه بازه اصلاح‌شده و شتاب‌یافته بوت‌استرپ (BCa) پایدار نبود، بازه صدکی به‌کار رفت. برای هر جفت کاربری، انتقال هاجز-لهمن به‌عنوان اندازه اختلاف مکانی و دلتا کلیف به‌عنوان اندازه اثر ترتیبی محاسبه شد. مقدار مطلق دلتا بر اساس حدود متداول کم‌تر از ۰/۱۴۷ ناچیز، ۰/۱۴۷ تا ۰/۳۳ کوچک، ۰/۳۳ تا ۰/۴۷۴ متوسط و بیش‌تر از ۰/۴۷۴ بزرگ تفسیر شد.

برای آزمون کلی سه کاربری از تصادفی‌سازی دقیق آماره رتبه‌ای کروسکال-والیس استفاده شد؛ همه ۷۵۶/۷۵۶ تخصیص متمایز ۱۵ مشاهده به سه گروه پنج‌تایی برچسب‌دار بررسی شد. این تعداد از رابطه $15/(5 \times 5 \times 5)!$ به‌دست آمد. در خانواده پیامدهای اصلی شامل زمان شروع رواناب، رواناب کل و رسوب کل، مقادیر احتمال با روش هولم اصلاح شد. در خانواده پیامدهای زمانی ثانویه شامل غلظت رویدادی، زمان‌های ۵۰ درصد و سهم هفت دقیقه نخست، نرخ کشف کاذب بنجامینی-هوچبرگ کنترل شد. مقایسه‌های دوتایی فقط پس از عبور آزمون کلی اصلاح‌شده انجام و درون هر پیامد با روش هولم کنترل شدند. برای سنجش اثر هر کرت بر نتیجه، تحلیل

۱۲-۲۲ و ۲۲-۳۰ دقیقه گردآوری شدند. حجم رواناب هر بازه از مجموع حجم نمونه رسوب‌دار و حجم مکمل همان بازه به دست آمد. رسوب هر نمونه پس از جداسازی و خشک‌کردن وزن شد. رواناب کل از مجموع پنج حجم بازه‌ای و رسوب کل از مجموع پنج جرم بازه‌ای محاسبه شد. غلظت رویدادی رسوب از نسبت رسوب کل به رواناب کل، برحسب گرم بر لیتر، به دست آمد. زمان رسیدن به ۵۰ درصد رواناب یا رسوب تجمعی با درونیابی خطی بین دو زمان نمونه‌برداری پیرامون آستانه ۵۰ درصد محاسبه شد.

ساختار داده و مرز استنباط

مجموعه داده مینا شامل ۱۹ رکورد اندازه‌گیری‌شده در شیب ۳۰ درصد بود. برای مقایسه متوازن کاربری‌ها، ۱۵ کرت سوخته شامل پنج تکرار کشاورزی، پنج تکرار جنگل پهن‌برگ و پنج تکرار جنگل سوزنی‌برگ وارد استنباط آماری شد. چهار رکورد شاهد شامل یک کشاورزی، دو پهن‌برگ و یک سوزنی‌برگ به علت تعداد کم و نامتوازن، در کنترل کیفیت و توصیف داده حفظ شدند اما در آزمون تفاوت کاربری‌ها وارد نشدند. واحد تحلیل، یک کرت منبع بود و هیچ سطر مشتق‌شده‌ای تکرار مستقل تلقی نشد.

مستندات تصویری سامانه و اجرای پژوهش



شکل ۳- مستندات تصویری سامانه و اجرای پژوهش: الف) کرت ساخته‌شده و شاسی تنظیم شیب؛ ب) واسنجی بارش؛ و پ) مراحل پیش از آتش، حین آتش تجویزی و پس از خاموش شدن. تصاویر از مستندات همین پژوهش استخراج و فقط از نظر چیدمان و وضوح بهینه‌شده‌اند.

حذف یک کرت برای هر ۱۵ کرت تکرار و پایداری ترتیب میانه‌ها، جهت انتقال هاجز-لهمن و جهت دلتا کلیف محاسبه شد.

تحلیل حساسیت مهندسی شیب

برای بررسی قابلیت بالقوه سامانه در طراحی آزمایش چندشیبی، پاسخ‌های مهندسی وابسته به داده مبنا در شیب‌های پنج تا ۵۰ درصد با گام پنج درصد محاسبه شد. تنها شیب ۳۰ درصد نقطه اندازه‌گیری شده و لنگر محاسبات بود. عامل شیب معادله جهانی تجدیدنظرشده هدررفت خاک (RUSLE) مطابق رنارد و همکاران [۹] محاسبه و بر مقدار شیب ۳۰ درصد نرمال شد. روابط عامل شیب به صورت زیر بود (رابطه ۲ و ۳):

$$S = 10.8 \sin(\alpha) + 0.03, \quad \text{slope} < 9\% \quad (1)$$

$$S = 16.8 \sin(\alpha) - 0.50, \quad \text{slope} \geq 9\% \quad (2)$$

در رابطه هندسی پیشین، S (%) شیب کرت برحسب درصد بود؛ در دو رابطه بالا، S بدون علامت درصد عامل شیب RUSLE و α زاویه سطح کرت نسبت به افق است.

پاسخ هر متغیر در شیب s از رابطه توانی زیر محاسبه شد. در این رابطه، $Y(s)$ پاسخ مهندسی متغیر در شیب s ، $Y(30)$ مقدار اندازه‌گیری شده در شیب ۳۰ درصد، $S(s)$ عامل شیب RUSLE در شیب s و b توان پاسخ است. توان مرکزی برای رواناب ۰/۱۵، برای رسوب ۰/۷۵ و برای زمان شروع رواناب ۰/۲۵- بود. برای رواناب دامنه توان صفر تا ۰/۳۰ و برای رسوب ۰/۵۵ تا یک به عنوان نوار حساسیت کم تا زیاد در نظر گرفته شد. این محاسبات آزمون معنی‌داری اثر شیب نبودند؛ هدف آنها غربالگری شیب‌های مناسب برای آزمایش واقعی بعدی و نشان‌دادن عدم قطعیت ناشی از انتخاب ضریب پاسخ بود (رابطه ۴).

$$Y(s) = Y(30) \times \left[\frac{S(s)}{S(30)} \right]^b \quad (1)$$

نتایج

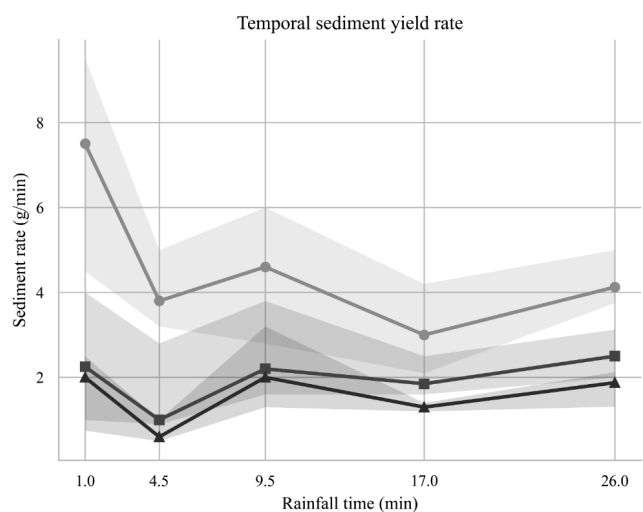
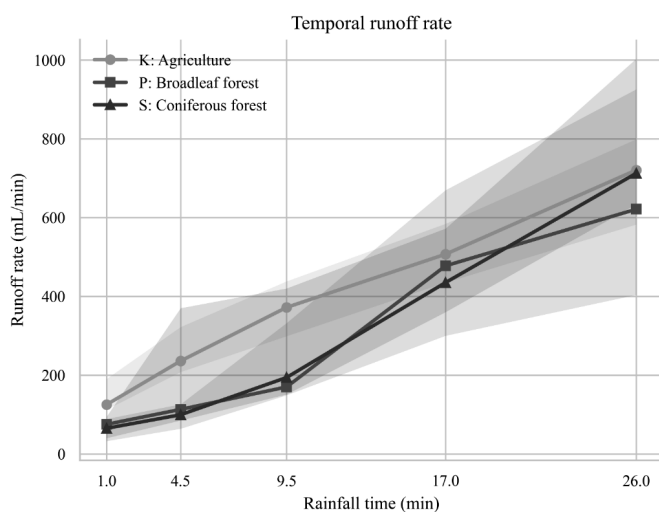
عملکرد سامانه و صحت بازسازی داده

شناسی امکان تغییر پیوسته زاویه و تثبیت کرت را بدون تخلیه خاک فراهم کرد. سطح ۰/۳۵ مترمربعی کرت به‌طور کامل در محدوده مؤثر بارش قرار داشت و ضریب یکنواختی بیش از ۸۶ درصد، توزیع قابل قبول بارش را در فشار ۰/۶ بار نشان داد. بازسازی رواناب کل از اجزای بازه‌ای و رسوب کل از نمونه‌های پنج‌گانه، برای هر ۱۹ رکورد بدون اختلاف عددی انجام شد؛ بیشینه خطای مطلق بازسازی برای هر دو متغیر صفر بود. در هیچ‌یک از ۱۵ کرت سوخته، داده گمشده مشاهده نشد.

زمان شروع و توزیع زمانی رواناب و رسوب

میانه زمان شروع رواناب در کشاورزی ۱/۱۵ دقیقه (بازه اطمینان ۹۵ درصد: ۰/۵۸ تا ۱/۵۶)، در جنگل سوزنی‌برگ ۳ دقیقه (۲/۳۰ تا ۳/۳۰) و در جنگل پهن‌برگ ۴/۳۷ دقیقه (۳/۵۵ تا ۵/۰۶) بود. تفاوت کلی پس از اصلاح خانوادگی معنی‌دار بود (P اصلاح‌شده = ۰/۰۰۰۰۲۴). انتقال هاجز-لهمن کشاورزی نسبت به پهن‌برگ ۳/۱۵ - دقیقه و نسبت به سوزنی‌برگ ۱/۷۶ - دقیقه بود؛ دلتا کلیف در هر دو مقایسه ۱- و نشان‌دهنده جدایی کامل ترتیبی داده‌ها بود. زمان شروع در پهن‌برگ نیز ۱/۳۷ دقیقه دیرتر از سوزنی‌برگ بود.

نرخ رواناب در هر سه کاربری با ادامه بارش افزایش یافت، اما کشاورزی در بخش آغازین رویداد بالاتر بود. میانه زمان رسیدن به ۵۰ درصد رواناب تجمعی در کشاورزی، پهن‌برگ و سوزنی‌برگ به ترتیب ۱۹/۱۲، ۲۰/۵۸ و ۲۱/۵۶ دقیقه بود. تفاوت کلی این شاخص معنی‌دار بود (P اصلاح‌شده = ۰/۰۰۰۰۱۱۹) و جهت هر سه اختلاف دوتایی در تحلیل حذف یک کرت ۱۰۰ درصد پایدار ماند. سهم رواناب هفت دقیقه نخست به ترتیب ۱۰/۰۵، ۶/۸۹ و ۵/۸۰ درصد بود؛ هرچند آزمون کلی پس از اصلاح در مرز پذیرش



شکل ۴: تغییرات زمانی نرخ رواناب و نرخ تولید رسوب در سه کاربری؛ خطوط نشان‌دهنده میانه و نوارها نشان‌دهنده دامنه بین چارکی پنج کرت است؛ K: کشاورزی، P: جنگل پهن‌برگ و S: جنگل سوزنی‌برگ.

قرار گرفت، پایداری جهت اختلاف‌ها فقط ۵۳ درصد بود و از این رو این شاخص صرفاً با احتیاط تفسیر شد. روند نرخ‌های زمانی در شکل (۴) ارائه شده است.

رواناب کل، رسوب کل و غلظت رویدادی

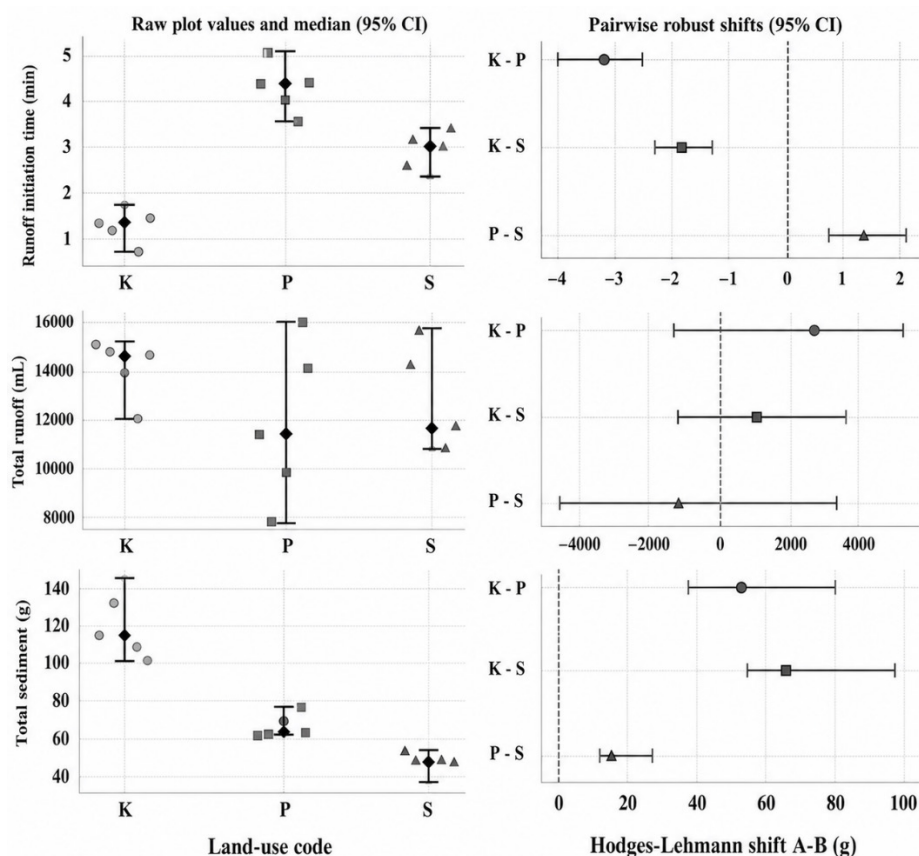
میان‌ه رواناب کل در کشاورزی، پهن‌برگ و سوزنی‌برگ به ترتیب ۱۴۵۳۰، ۱۱۳۴۷ و ۱۱۶۶۵ میلی‌لیتر بود. بازه‌های اطمینان، به‌ویژه در پهن‌برگ، هم‌پوشانی زیادی داشتند و آزمون کلی تفاوت کاربری‌ها را تأیید نکرد (P اصلاح‌شده = ۰/۴۰۲۷). ترتیب میان‌ه رواناب در تحلیل حذف یک کرت فقط در ۶۷ درصد تکرارها حفظ شد؛ بنابراین،

برتری عددی کشاورزی در رواناب کل به‌عنوان نتیجه توصیفی گزارش شد.

در مقابل، میان‌ه رسوب کل کشاورزی ۱۱۴ گرم (۱۰۰ تا ۱۴۸)، پهن‌برگ ۶۲ گرم (۶۰/۵ تا ۷۶) و سوزنی‌برگ ۴۸/۵ گرم (۳۴/۵ تا ۵۳) بود. تفاوت کلی پس از اصلاح معنی‌دار بود (P اصلاح‌شده = ۰/۰۰۰۰۲۴). انتقال هاجز-لهمن کشاورزی نسبت به پهن‌برگ ۵۲ گرم، کشاورزی نسبت به سوزنی‌برگ ۶۷/۳ گرم و پهن‌برگ نسبت به سوزنی‌برگ ۱۵/۳ گرم بود؛ دلتا کلیف هر سه مقایسه برابر ۱ و جهت اثر در همه تحلیل‌های حذف یک کرت ثابت ماند. خلاصه پیامدهای اصلی و زمانی پایدار در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲: میان‌ه (بازه اطمینان بوت‌استرپ ۹۵ درصد) پیامدهای منتخب در سه کاربری و نتیجه آزمون کلی اصلاح‌شده.

پیامد	کشاورزی	جنگل پهن‌برگ	جنگل سوزنی‌برگ	P اصلاح‌شده	تفسیر
زمان شروع رواناب (دقیقه)	۱/۱۵ (۱/۵۶-۰/۵۸)	۴/۳۷ (۵/۰۶-۳/۵۵)	۳/۰۰ (۳/۳۰-۲/۳۰)	۰/۰۰۰۰۲۴	شواهد قوی
رواناب کل (میلی‌لیتر)	۱۴۵۳۰ (۱۴۸۹۵-۱۱۹۶۵)	۱۱۳۴۷ (۱۵۹۵۵-۷۵۹۰)	۱۱۶۶۵ (۱۵۷۶۳-۱۰۷۹۰)	۰/۴۰۲۷	توصیفی
رسوب کل (گرم)	۱۱۴/۰ (۱۴۸/۰-۱۰۰/۰)	۶۲/۰ (۷۶/۰-۶۰/۵)	۴۸/۵ (۵۳/۰-۳۴/۵)	۰/۰۰۰۰۲۴	شواهد قوی
غلظت رویدادی (گرم بر لیتر)	۸/۹۹ (۱۰/۶۳-۶/۸۸)	۵/۳۳ (۸/۰۴-۴/۳۶)	۳/۶۷ (۴/۴۹-۳/۱۱)	۰/۰۰۰۶۷۴	شواهد قوی
زمان ۵۰ درصد رواناب (دقیقه)	۱۹/۱۲ (۲۰/۳۴-۱۴/۶۶)	۲۰/۵۸ (۲۱/۱۴-۲۰/۱۲)	۲۱/۵۶ (۲۲/۴۳-۲۱/۲۴)	۰/۰۰۰۱۱۹	شواهد قوی



شکل ۵: مقادیر خام، میان‌ه و بازه اطمینان ۹۵ درصد پیامدهای اصلی و انتقال‌های مقاوم هاجز-لهمن میان کاربری‌ها؛ K: کشاورزی، P: جنگل پهن‌برگ و S: جنگل سوزنی‌برگ

میانۀ غلظت رویدادی رسوب در کشاورزی ۸/۹۹ پهن‌برگ ۵/۳۳ و سوزنی‌برگ ۳/۶۷ گرم بر لیتر بود. تفاوت کلی معنی‌دار بود (P اصلاح‌شده = ۰/۰۰۰۶۷۴). اختلاف کشاورزی با سوزنی‌برگ و پهن‌برگ با سوزنی‌برگ پس از اصلاح دوتایی حفظ شد؛ انتقال هاجز-لهمن آنها به‌ترتیب ۴/۹۹ و ۱/۶۶ گرم بر لیتر و دلتا کلیف به‌ترتیب یک و ۰/۹۲ بود. نتایج خام، میانۀها و انتقال‌های مقاوم سه پیامد اصلی در شکل (۵) نشان داده شده‌اند.

پایداری نتایج

حذف جداگانه هر یک از ۱۵ کرت، ترتیب میانۀ زمان شروع رواناب و رسوب کل را تغییر نداد و جهت همه انتقال‌ها و دلتاهای کلیف برای این دو پیامد ۱۰۰ درصد پایدار بود. غلظت رویدادی و زمان رسیدن به ۵۰ درصد رواناب نیز شواهد پایداری بالایی داشتند. در مقابل، رواناب کل، زمان رسیدن به ۵۰ درصد رسوب و سهم‌های ابتدای رویداد به یک یا چند کرت حساس‌تر بودند. بر این اساس، ادعاهای اصلی مقاله به زمان شروع رواناب، رسوب کل، غلظت رویدادی و زمان ۵۰ درصد رواناب محدود شد.

پاسخ مهندسی به تغییر شیب

تحلیل حساسیت نشان داد رسوب نسبت به تغییر عامل شیب بیش‌ترین پاسخ را داشت. در مقایسه با لنگر ۳۰ درصد، کاهش شیب به ۱۰ درصد در پاسخ مرکزی با کاهش ۶۲/۵ درصدی رسوب، کاهش ۱۷/۸ درصدی رواناب و افزایش ۳۸/۶ درصدی زمان شروع همراه بود. افزایش شیب به ۴۰ درصد، رسوب را ۲۳/۶ درصد و رواناب را ۴/۳ درصد افزایش و زمان شروع را ۶/۸ درصد کاهش داد. در شیب ۵۰ درصد، تغییرات متناظر ۴۳/۶، ۷/۵ و ۱۱/۴- درصد بود.

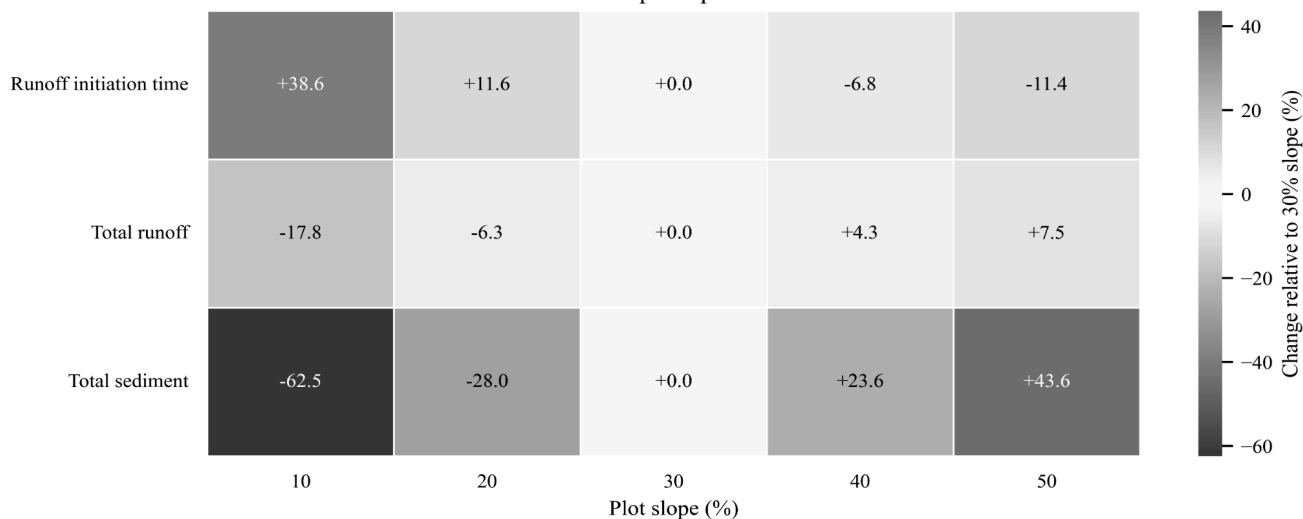
آستانه افزایش ۲۵ درصدی رسوب در شیب تقریبی ۴۰/۷ درصد و آستانه افزایش پنج درصدی رواناب در شیب تقریبی ۴۲ درصد حاصل شد. افزایش ۱۰ درصدی رواناب در دامنه پنج تا ۵۰ درصد رخ نداد. این تفاوت نشان داد که در چارچوب مفروض، رسوب شاخص حساس‌تری از حجم رواناب برای غربالگری اثر شیب است. ماتریس تغییرات منتخب نسبت به شیب ۳۰ درصد در شکل (۶) ارائه شده است.

بحث

کارایی کرت و باران‌ساز برای آزمایش‌های ترویجی و پژوهشی ترکیب کرت کوچک با شاسی قابل تنظیم، سه مزیت عملی داشت: حفظ آرایش خاک هنگام تغییر زاویه، جمع‌آوری مستقیم رواناب و رسوب در خروجی و امکان تکرار آزمایش در فضای محدود. ضریب یکنواختی بیش از ۸۶ درصد در دامنه گزارش‌شده برای بسیاری از باران‌سازهای کوچک قرار داشت. ایزرلو و همکاران [۷] در مقایسه چند سامانه اروپایی ضرایب ۶۱ تا ۹۸ درصد و بولانژ و همکاران [۲] ضرایب ۷۹ تا ۹۴ درصد را گزارش کردند. مقدار ۸۰/۴ درصد نیز برای سامانه زمکه [۱۱] گزارش شده است؛ بنابراین، یکنواختی سامانه حاضر برای مقایسه درون‌آزمایشگاهی مناسب ارزیابی شد، هرچند مقایسه مستقیم نتایج میان دستگاه‌ها بدون اندازه‌گیری انرژی جنبشی و توزیع اندازه قطره توصیه نمی‌شود.

در طراحی ترویجی، مشاهده مسیر «مخزن-پمپ-کنترل فشار-نازل-کرت-خروجی» به فهم ارتباط اجزای هیدرولیکی و پاسخ خاک کمک می‌کند. امکان تنظیم زاویه نیز اجازه می‌دهد پیش از اجرای یک طرح پرهزینه، رفتار احتمالی سامانه در دامنه‌ای از شیب‌ها نمایش داده و شیب‌های اولویت‌دار انتخاب شوند.

Practical slope-response matrix



شکل ۶: ماتریس پاسخ مهندسی زمان شروع رواناب، رواناب کل و رسوب کل در شیب‌های منتخب نسبت به مقدار اندازه‌گیری‌شده در شیب ۳۰ درصد

باین حال، واسنجی باید پس از هر تغییر نازل، فشار، ارتفاع یا سطح مؤثر بارش تکرار شود؛ زیرا این متغیرها بر شدت، یکنواختی و انرژی قطره اثر دارند [۲، ۷ و ۱۱].

تفاوت پاسخ کاربری‌ها

شروع بسیار زودتر رواناب در کشاورزی نشان می‌دهد ظرفیت ذخیره سطحی و تأخیر هیدرولوژیک این خاک پس از تیمار آتش کم‌تر از دو خاک جنگلی بوده است. جدایی کامل مقادیر زمان شروع میان سه کاربری و پایداری ۱۰۰ درصدی آن پس از حذف تک‌کرت، این شاخص را به یکی از روشن‌ترین خروجی‌های سامانه تبدیل کرد. در آبخیز توشن، عجمی و همکاران [۱] اثر معنی‌دار کاربری و توپوگرافی بر ذخیره کربن آلی خاک را گزارش کردند. ویژگی‌هایی مانند بافت، کربن آلی، پایداری خاکدانه، وزن مخصوص ظاهری، تخلخل، زبری سطح و آب‌گریزی نیز می‌توانند از مسیر تغییر نفوذ، حفظ ساختمان و منافذ، ذخیره سطحی و ترشوندگی بر زمان آغاز رواناب و جدایش ذرات اثر بگذارند [۸]. این ویژگی‌ها برای رکوردهای تحلیل حاضر به‌صورت مستقل و هم‌زمان اندازه‌گیری نشدند؛ بنابراین فقط سازوکارهای محتمل اند و سهم جداگانه هیچ‌یک برآورد نشده است.

رسوب کل کشاورزی تقریباً دو برابر پهن‌برگ و بیش از دو برابر سوزنی‌برگ بود، درحالی‌که شواهد کافی برای تفاوت رواناب کل مشاهده نشد. این ناهمخوانی نشان می‌دهد حجم رواناب به‌تنهایی برای تشخیص خطر فرسایش کافی نیست. افزایش غلظت رویدادی در کشاورزی تأیید می‌کند که بخش مهمی از اختلاف رسوب از قابلیت جدایش و انتقال بیش‌تر ذرات ناشی شده است، نه فقط از آب خروجی بیش‌تر. یافته‌های میدانی پس از آتش نیز نشان داده‌اند که تغییرات سطح خاک می‌تواند افزایش رسوب را شدیدتر از افزایش رواناب کند [۱۰]. از دید مدیریت آبخیز، ترکیب زمان شروع، غلظت رسوب و جرم کل، تصویر کاربردی‌تری از خطر نسبت به گزارش یک متغیر منفرد ارائه می‌دهد.

دیرتر بودن زمان ۵۰ درصد رواناب در جنگل سوزنی‌برگ و پهن‌برگ نشان داد توزیع خروجی در طول رویداد نیز میان کاربری‌ها متفاوت بود. باین حال، شاخص‌های هفت دقیقه نخست و زمان ۵۰ درصد رسوب پایداری کم‌تری داشتند. گزارش محتاطانه این شاخص‌ها مهم است، زیرا در نمونه کوچک یک کرت با پاسخ شدید می‌تواند نتیجه را جابه‌جا کند. تحلیل حذف یک کرت در این پژوهش نقش مکمل آزمون معنی‌داری را داشت و از تبدیل نتایج ناپایدار به پیام ترویجی قاطع جلوگیری کرد.

تفسیر تحلیل حساسیت شیب

پاسخ مرکزی تحلیل مهندسی نشان داد افزایش شیب از ۳۰ به ۴۰ درصد برای رسوب مهم‌تر از رواناب است. این الگو با نقش مستقیم‌تر شیب در توان انتقال و جدایش و با ساختار عامل شیب

RUSLE سازگار است [۹]. سامویل و همکاران [۱۰] در اندازه‌گیری میدانی پس از آتش، افزایش بسیار بزرگ‌تری را هنگام تغییر شیب از ۲۰ به ۴۰ درصد مشاهده کردند. اختلاف دامنه پاسخ آن مطالعه با برآورد حاضر یادآور می‌شود که ضرایب توانی این پژوهش جایگزین آزمایش چندشیبی نیستند و شرایط سوختگی، خاک و بارش می‌تواند پاسخ را به‌طور چشمگیری تغییر دهد.

آستانه تقریبی ۴۰ تا ۴۲ درصد در این تحلیل باید به‌عنوان معیار طراحی آزمایش تفسیر شود. پیشنهاد کاربردی آن است که در مرحله اعتبارسنجی، دست‌کم سه شیب واقعی در دو سوی لنگر ۳۰ درصد، برای مثال ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد، با حداقل سه تکرار مستقل برای هر ترکیب کاربری و تیمار اجرا شود. افزودن شیب ۵۰ درصد می‌تواند رفتار مرزی را نشان دهد، اما به‌دلیل فاصله بیش‌تر از نقطه لنگر، عدم قطعیت آن بالاتر است. مزیت اصلی کرت ساخته‌شده این است که چنین طرحی بدون ساخت بدنه جدید قابل اجرا است.

محدودیت‌ها

نتایج مقایسه کاربری‌ها به پنج تکرار سوخته در هر گروه محدود بود. تعداد شاهدها برای استنباط اثر آتش کافی و متوازن نبود؛ بنابراین، مقاله درباره تفاوت سوخته و شاهد ادعای آزمون‌شده ارائه نمی‌کند. هم‌چنین، با وجود قابلیت مکانیکی کرت برای تنظیم شیب، تنها شیب ۳۰ درصد به‌صورت آزمایشی اندازه‌گیری شد؛ بنابراین اثر تجربی شیب در این مطالعه آزمون نشده و پاسخ‌های سایر شیب‌ها صرفاً پاسخ‌های مهندسی وابسته به داده مبنا هستند. این محدودیت در عنوان، چکیده، روش، بحث و نتیجه‌گیری تصریح شد و ادعای پژوهش به طراحی سامانه، ارزیابی عملکرد آن در شیب ۳۰ درصد و غربالگری شیب‌های مناسب برای آزمایش آینده محدود است. بازسازی خاک در کرت، ناهمگنی طبیعی ریشه، درشت‌حفره و پیوستگی دامنه را کاهش می‌دهد و تعمیم مستقیم مقادیر به آبخیز باید با احتیاط انجام شود. در نهایت، اگرچه یکنواختی و شدت بارش واسنجی شد، سرعت سقوط، توزیع اندازه قطره و انرژی جنبشی بارش برای این آرایش به‌طور کمی گزارش نشد. اندازه‌گیری این شاخص‌ها در مرحله بعد، قابلیت مقایسه دستگاه با بارش طبیعی و سایر باران‌سازها را افزایش خواهد داد.

نتیجه‌گیری

کرت گالوانیزه ۱۰۰×۳۵×۱۵ سانتی‌متری همراه با شاسی قابل تنظیم و شبیه‌ساز باران دلتالب، یک سامانه فشرده برای مشاهده و اندازه‌گیری رواناب و رسوب فراهم کرد. ضریب یکنواختی بیش از ۸۶ درصد و بازسازی بدون خطای اجزای خروجی، کارکرد مناسب سامانه را در شرایط آزمایش تأیید کرد. در میان سه کاربری سوخته، کشاورزی زودترین شروع رواناب، بیش‌ترین رسوب کل و بیش‌ترین غلظت رویدادی را داشت؛ این سه الگو در تحلیل حذف یک کرت پایدار بودند. در مقابل، شواهد کافی برای تفاوت

6. Elliot, W.J. 2024. Runoff and erosion following a prescribed fire on a sagebrush-steppe rangeland in Idaho, USA. *Journal of the ASABE*, 67(6): 1481–1498.

7. Iserloh, T., Ries, J.B., Arnáez, J., Boix-Fayos, C., Butzen, V., Cerdà, A., Echeverría, M.T., Fernández-Gálvez, J., Fister, W., Geißler, C., Gómez, J.A., Gómez-Macpherson, H., Kuhn, N.J., Lázaro, R., León, F.J., Martínez-Mena, M., Martínez-Murillo, J.F., Marzen, M., Mingorance, M.D., Ortigosa, L., Peters, P., Regüés, D., Ruiz-Sinoga, J.D., Scholten, T., Seeger, M., Solé-Benet, A., Wengel, R., and Wirtz, S. 2013. European small portable rainfall simulators: A comparison of rainfall characteristics. *Catena*, 110, 100–112.

8. Noske, P.J., Nyman, P., Lane, P.N.J., Rengers, F.K., and Sheridan, G.J. 2024. Changes in soil erosion caused by wildfire: A conceptual biogeographic model. *Geomorphology*, 459, 109272.

9. Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., McCool, D.K., and Yoder, D.C. 1997. Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). USDA Agriculture Handbook No. 703, Washington, DC, 404 pp.

10. Samoil, M., Owens, P.N., Ali, F., and Miller, B. 2026. The effects of soil burn severity and slope steepness on post-wildfire hillslope runoff and soil erosion using a portable rainfall simulator in British Columbia, Canada. *Journal of Soils and Sediments*, 26, 19.

11. Zemke, J.J. 2017. Set-up and calibration of a portable small scale rainfall simulator for assessing soil erosion processes at interrill scale. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 43(1), 63–81.

رواناب کل مشاهده نشد و نباید به عنوان برتری معنی دار یک کاربری گزارش شود.

تحلیل پاسخ مهندسی وابسته به داده مینا، لنگر شده در شیب ۳۰ درصد، نشان داد رسوب نسبت به افزایش شیب حساس تر از حجم رواناب است و محدوده نزدیک ۴۰ درصد می تواند برای اعتبارسنجی آزمایشگاهی در اولویت قرار گیرد. این نتیجه یک آستانه مهندسی برای طراحی آزمایش است، نه اثر اندازه گیری شده یا آستانه آماری. از دید ترویجی، سامانه پیشنهادی می تواند برای آموزش فرایند بارش-رواناب-رسوب، مقایسه خاک ها و پوشش ها، نمایش اثر احتمالی شیب و انتخاب تیمارهای حفاظتی به کار رود. برای استفاده پژوهشی بعدی، اجرای آزمایش واقعی در شیب های ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد، متوازن کردن شاهدها و اندازه گیری انرژی جنبشی قطرات پیشنهاد می شود.

منابع

1. Ajami, M., Heidari, A., Khormali, F., Gorji, M., and Ayoubi, S. 2016. Environmental factors controlling soil organic carbon storage in loess soils of a subhumid region, northern Iran. *Geoderma*, 281: 1–10.

2. Boulange, J., Malhat, F., Jaikaew, P., Nanko, K., and Watanabe, H. 2019. Portable rainfall simulator for plot-scale investigation of rainfall-runoff, and transport of sediment and pollutants. *International Journal of Sediment Research*, 34(1), 38–47..

3. Brucker, C.P., Livneh, B., Butler, C.E., and Rosario-Ortiz, F.L. 2024. A laboratory-scale simulation framework for analysing wildfire hydrologic and water quality effects. *International Journal of Wildland Fire*, 33, WF23050.

4. Christiansen, J.E. 1942. Irrigation by sprinkling. California Agricultural Experiment Station Bulletin 670, University of California, Berkeley, 124 pp.

5. East, A.E., Logan, J.B., Dow, H.W., Smith, D.P., Iampietro, P., Warrick, J.A., Lorenson, T., Hallas, L., and Kozłowicz, B. 2024. Post-fire sediment yield from a central California watershed: Field measurements and validation of the WEPP model. *Earth and Space Science*, 11: e2024EA003575.



Abstract

Design and Performance Evaluation of an Adjustable-Slope Erosion Plot under Simulated RainfallK. Heidary^{1*}

Received: 2026/07/28 Accepted: 2026/09/01

Fixed-slope erosion plots limit controlled examination of the effects of slope. This study introduced an adjustable-slope erosion plot, evaluated its application with a DeltaLab rainfall simulator, and compared hydrosedimentary responses among three land uses in the Toshan watershed, Golestan Province, Iran. Rainfall at an intensity of 80 mm h^{-1} was applied for 30 min to burned cropland, broadleaf forest, and coniferous forest plots (five replicates per land use); 30% was the only experimentally measured slope, and results for other slopes represent only baseline-dependent engineering responses. Runoff initiation time, interval runoff and sediment, event totals, and time to reach 50% of the cumulative response were calculated. Robust estimates, 95% bootstrap confidence intervals, randomization tests, Cliff's delta, and leave-one-plot-out analyses were used. Median runoff initiation times were 1.15, 3.00, and 4.37 min in cropland, coniferous forest, and broadleaf forest, respectively. Median total sediment was 114, 48.5, and 62 g, and event sediment concentrations were 8.99 , 3.67 , and 5.33 g L^{-1} , respectively; these patterns remained stable in the sensitivity analyses. There was insufficient evidence of differences in total runoff. In an engineering sensitivity analysis anchored at a 30% slope, increasing the slope to 40% was associated with a 23.6% increase in sediment, a 4.3% increase in runoff, and a 6.8% reduction in runoff initiation time. The proposed system is a practical tool for training, screening critical slopes, and designing erosion experiments.

Keywords: Adjustable-slope erosion plot, Prescribed fire, Rainfall simulator, Runoff, sediment yield, Soil erosion, Watershed management.

1. Research Assistant Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Khuzestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Ahvaz, Iran Corresponding Authors' E-mail: k.heidary@areeo.ac.ir