وزارت جهاد کشاورزی
سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی
پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری

دستورالعمل فنی

واسنجی برج شبیه‌ساز باران پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری برای تولید شدت‌های مختلف بارندگی

نویسندگان:

زهرا گرامی - رضا بیات

شماره ثبت: ۶۹۱۶۹

۱۴۰۵

وزارت جهاد کشاورزی
سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی
پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری

دستورالعمل فنی:

واسنجی برج شبیه‌ساز باران پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری
برای تولید شدت‌های مختلف بارندگی

نویسندگان:
زهرا گرامی، رضا بیات

شماره ثبت: ۶۹۱۶۹

۱۴۰۵

وزارت جهادکشاورزی
سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی
پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری

عنوان: واسنجی برج شبیه‌ساز باران پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری برای تولید شدت‌های مختلف بارندگی

نویسندگان: زهرا گرامی، رضا بیات

ویراستار ادبی: سعید نبی‌پی لشکریان

طراحی جلد و صفحه آرایی: عباس صدیق

ناشر: پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری

شمارگان: ۱۰ نسخه

تاریخ انتشار: بهار ۱۴۰۵

این اثر در مورخه **۱۴۰۵/۰۲/۰۲** با شماره **۶۹۱۶۹** در مرکز اطلاعات و مدارک علمی کشاورزی به ثبت رسیده است. حق چاپ محفوظ است. نقل مطلب، تصاویر، جداول، منحنی‌ها و نمودارها با ذکر مأخذ بلامانع است.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

چکیده ۱
۱- مقدمه ۲
۲- آزمایشگاه شبیه‌ساز باران ۴
۲-۱- سامانه آبرسانی برای شبیه‌سازی باران ۴
۲-۲- سامانه آبرسانی برای شبیه‌سازی جریان سطحی ۵
۲-۳- فلوم شیب‌پذیر ۵
۲-۴- اتاق کنترل ۵
۲-۵- سامانه جمع‌آوری آب‌های مازاد ۶
۳- مراحل واسنجی شبیه‌ساز باران در شدت‌های مختلف ۶
۳-۱- هدف ۶
۳-۲- تجهیزات موردنیاز ۶
۳-۳- آماده‌سازی سامانه شبیه‌ساز باران ۷
۳-۴- چیدمان ظروف جمع‌آوری ۷
۳-۵- اجرای بارش برای هر نازل ۸
۳-۶- محاسبه شدت بارندگی ۸
۳-۷- محاسبه ضریب یکنواختی کریستینسن (CU) ۸
۳-۸- مرحله محاسبه‌ای شدت باران اولیه برای هر نازل در Excel ۸
۳-۹- اندازه‌گیری مشاهده‌ای توزیع بارش و محاسبه یکنواختی ۹
۳-۱۰- تحلیل نتایج و تصمیم‌گیری ۹
۳-۱۱- ثبت نتایج و مستندسازی ۱۰
۳-۱۲- توصیه‌ها ۱۰
۳-۱۳- عوامل مؤثر بر بروز خطا در واسنجی باران‌ساز ۱۱
۳-۱۳-۱- نوسان فشار آب ۱۱

۳-۱۳-۲- عدم یکنواختی بارش نازل‌ها ۱۱
۳-۱۳-۳- خطا در اندازه‌گیری حجم آب جمع‌آوری‌شده ۱۲
۳-۱۳-۴- اختلاف سطح و شیب محل آزمایش ۱۲
۳-۱۳-۵- خطا در زمان‌سنجی بارش ۱۲
۳-۱۳-۶- تأثیر باد و جریان هوا ۱۲
۳-۱۳-۷- اشتباه در محاسبات ۱۲
نتیجه‌گیری ۱۳
پیشنهادهای کلیدی: ۱۴
منابع مورد استفاده ۱۴
Abstract ۱۶

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۱- نمایی از آزمایشگاه شبیه‌ساز باران و فرسایش پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری ۴
شکل ۲- چیدمان ظروف (الف) و پوشش روی سطح فلوم (ب) برای اندازه‌گیری شدت متوسط بارش ۷

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول ۱- فرم ثبت داده‌های واسنجی باران‌ساز در شدت مشخص به‌طور مثال ۶۰ میلی متر بر ساعت.... ۱۰
جدول ۲- چک‌لیست کنترل کیفیت پیش از واسنجی باران‌ساز ۱۳

چکیده

شبیه‌سازهای باران ابزارهایی کلیدی در مطالعات مرتبط با فرسایش خاک، رواناب سطحی و مدیریت منابع آب و خاک محسوب می‌شوند. برای اطمینان از صحت داده‌های حاصل از این دستگاه‌ها، فرایند واسنجی به‌عنوان گامی اساسی پیش از هر آزمایش تلقی می‌شود. این دستورالعمل به ارائه یک روش گام‌به‌گام برای واسنجی باران‌ساز در شدت‌های بارندگی مختلف پرداخته است. در این روش، شدت واقعی بارش از طریق جمع‌آوری آب در ظروف مشخص و محاسبه بر حسب حجم، مساحت و زمان بارش به‌دست آمد. برای انجام واسنجی، بعد از چیدمان ظروف جمع‌آوری باران، بارش برای هر نازل اجرا و در نهایت شدت بارندگی و شاخص یکنواختی باران با استفاده از ضریب یکنواختی کریستینسن (CU) محاسبه و تحلیل شد. در مرحله بعد، شدت باران اولیه برای هر نازل در Excel محاسبه و ترکیب داده‌های شدت باران مربوط به چند نازل در محیط Excel برای بررسی همپوشانی مخروط‌های بارش و رسیدن به شدت باران مورد نظر انجام شد. بیان این نکته ضروری است که واسنجی قبل از هر تحقیقی باید انجام شود. عوامل مؤثر بر خطا مانند نوسان فشار آب، شیب سطح، خطای زمانی و تأثیر جریان باد نیز شناسایی و فهرست شدند. این دستورالعمل می‌تواند به‌عنوان مرجع عملی برای پژوهشگران و کارشناسان در واسنجی باران‌سازها مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: تلفات خاک، خطاهای آزمایشگاهی، ضریب یکنواختی کریستینسن، فرسایش خاک، یکنواختی باران.

۱- مقدمه

شبیه‌سازهای باران[1] ابزارهایی کلیدی در مطالعات هیدرولوژیکی، فرسایش خاک، رواناب سطحی، بررسی عملکرد پوشش گیاهی و اثر مواد افزودنی خاک محسوب می‌شوند. این دستگاه‌ها با هدف ایجاد بارندگی کنترل‌شده در محیط‌های آزمایشگاهی یا مزرعه‌ای، امکان تکرارپذیری آزمایش‌ها و ارزیابی دقیق پدیده‌های مختلف را فراهم می‌سازند (Miller و همکاران، ۲۰۲۰؛ Klik و Dvořák، ۲۰۲۱). از مهم‌ترین مزایای این شبیه‌سازها، توانایی در بازتولید بارش با شدت، اندازه قطرات، الگوی زمانی و طول مدت مشخص است. این مؤلفه‌های بارش در شرایط طبیعی به‌دلیل تنوع اقلیمی و ناپایداری‌های محیطی قابل کنترل نیستند (Cerdà و همکاران، ۲۰۱۶).

در میان اجزای مختلف یک باران‌ساز، سیستم نازل، فشار آب و ارتفاع نصب نازل‌ها نقش حیاتی در تعیین ویژگی‌های بارش مصنوعی دارند. ازاین‌رو، دقت در تنظیم فشار، فاصله نازل از سطح و بررسی یکنواختی و شدت واقعی بارندگی تولیدشده، برای اطمینان از صحت نتایج آزمایش‌ها ضروری است. عدم دقت در این موارد می‌تواند منجر به بروز خطاهای سیستماتیک در اندازه‌گیری رواناب، فرسایش یا انتقال رسوب شود (Seutloali و همکاران، ۲۰۱۹؛ Iserloh و همکاران، ۲۰۱۶).

فرایند واسنجی باران‌ساز با هدف ارزیابی عملکرد دستگاه در تولید شدت‌های مشخص بارندگی، تعیین میزان یکنواختی بارش، و سنجش تطابق آن با شدت‌های طراحی‌شده انجام می‌شود. معمولاً این فرایند شامل اندازه‌گیری حجم آب جمع‌آوری‌شده در ظروف مشخص در یک بازه زمانی معین و محاسبه شدت واقعی بارندگی برحسب میلی‌متر بر ساعت است. محققان توصیه می‌کنند که واسنجی نه‌تنها پیش از آغاز هر سری آزمایش انجام شود، بلکه در صورت هرگونه تغییر در پارامترهای فنی سیستم از جمله نوع نازل، فشار یا ارتفاع نیز تکرار شود (Iserloh و همکاران، ۲۰۱۳).

واسنجی دقیق باران‌ساز تنها تضمین‌کننده اعتبار داده‌ها در آزمایش‌های محلی نیست، بلکه نقشی مهم در مقایسه‌پذیری بین‌المللی داده‌ها، اعتبارسنجی مدل‌های شبیه‌سازی و توسعه دستورالعمل‌های مدیریتی در

[1] Rainfall Simulators

حوزه حفاظت منابع آب و خاک ایفا می‌کند (Ries و همکاران، ۲۰۲۱). همچنین، در سال‌های اخیر با گسترش استفاده از باران‌سازها در مدل‌سازی عددی، آموزش دانشگاهی و پروژه‌های پایش بلندمدت، نیاز به تدوین روش‌های استاندارد و تکرارپذیر برای واسنجی بیش‌ازپیش احساس می‌شود (Nunes و همکاران، ۲۰۱۷).

سامانه شبیه‌ساز باران پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری به‌عنوان یکی از پیشرفته‌ترین ابزارهای آزمایشگاهی برای بررسی فرسایش خاک، تولید رواناب، و عملکرد مواد اصلاحی، از قابلیت‌های فنی منحصربه‌فردی برخوردار است. این سامانه تحت فشار طراحی شده و دارای ویژگی‌هایی همچون:

- ارتفاع نازل‌ها تا ۷/۷۵ متر از سطح فلوم
- ابعاد فلوم: شش متر طول و ۱ متر عرض
- قابلیت تغییر شیب از صفر تا ۶۰ درصد
- امکان تولید بارش تا شدت ۱۲۵ میلی‌متر بر ساعت
- قابلیت شبیه‌سازی باران و رواناب به‌طور مجزا یا همزمان
- امکان اجرای مجزای باران یا رواناب است (عرب‌خدری و همکاران، ۱۳۸۷).

واسنجی این سامانه برای اطمینان از دقت بارش و یکنواختی بارندگی قبل از انجام آزمایش‌های خاک، گامی ضروری به شمار می‌رود. در ادامه، ابتدا به معرفی اجزای مختلف آزمایشگاه پرداخته می‌شود. شکل ۱، نمایی از فلوم شبیه‌ساز باران مورد استفاده در دستورالعمل را نشان می‌دهد.

شکل ۱- نمایی از آزمایشگاه شبیه‌ساز باران و فرسایش پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری

۲- آزمایشگاه شبیه‌ساز باران

سامانه شبیه‌ساز باران پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری با توجه به ویژگی‌های منحصر به فرد خود، نقش مهمی در انجام پژوهش‌های مرتبط با فرسایش و هیدرولوژی ایفا می‌کند. در ادامه، اجزا و مشخصات بخش‌های مختلف این سامانه معرفی می‌شوند (عرب‌خدری و همکاران، ۱۳۸۷).

۲-۱- سامانه آبرسانی برای شبیه‌سازی باران

برای تأمین آب مورد نیاز شبیه‌سازی باران، از یک مخزن با ظرفیت ۳۰۰۰ لیتر استفاده می‌شود. به‌دلیل تحت‌فشاربودن سامانه و ارتفاع صفحه بارش، یک الکتروموتور مدل 100 L2 با توان ۳ کیلووات و سرعت ۲۸۲۰

دور در دقیقه به‌کار گرفته شده است. جریان ورودی به نازل‌ها توسط یک مقسم مناسب یکنواخت‌سازی می‌شود و فشار آب با کمک فشارسنجی با ظرفیت ۲/۵ اتمسفر قابل پایش است. صفحه بارش شامل شش نازل از نوع BEX-S30W با قطر خروجی ۴/۵ میلی‌متر است که بر روی ریلی به طول شش متر و در ارتفاع ۷/۷۵ متری از سطح فلوم نصب شده‌اند (عرب‌خدری و همکاران، ۱۳۸۷).

۲-۲- سامانه آبرسانی برای شبیه‌سازی جریان سطحی

آب موردنیاز برای ایجاد جریان سطحی توسط پمپی مستقل تأمین می‌شود. در ابتدای فلوم، مخزنی طراحی شده که خروجی آن به‌صورت سرریز مستطیلی همراه با دو شیر در ابعاد مختلف است تا امکان تنظیم دقیق دبی ورودی فراهم شود. آب خروجی پس از عبور از این سرریز وارد حوضچه آرامش می‌شود که از تعدادی لوله PVC با قطر یک سانتی‌متر تشکیل شده و وظیفه آن کاهش تلاطم جریان است. در انتهای فلوم نیز سامانه‌ای قیفی‌شکل برای جمع‌آوری رواناب و رسوب تعبیه شده است.

۲-۳- فلوم شیب‌پذیر

فلوم مورد استفاده دارای ابعاد ۶ متر طول، ۱ متر عرض و ۰/۸ متر ارتفاع است. ابعاد ذکرشده کمینه ابعاد لازمی است تا بتوان علاوه بر فرسایش سطحی، فرسایش شیاری و در شرایط خاص فرسایش آبکندی را نیز پایش کرد و بر روی شاسی فلزی قرار دارد. شیب طولی فلوم با کمک جک هیدرولیکی تا ۶۰ درصد قابل تنظیم است و نیروی لازم از سامانه پاورپک تأمین می‌شود. پس از تنظیم شیب، فلوم با استفاده از گیره‌های قلابی در جای خود ثابت می‌شود.

۲-۴- اتاق کنترل

برای مدیریت فرآیندهای شبیه‌سازی، اتاق کنترلی در کنار ساختمان شبیه‌ساز ساخته شده است. در این اتاق جعبه فرمانی مجهز به صفحه کلید قرار دارد که هدایت تمامی سامانه‌ها از طریق آن انجام می‌شود.

۲-۵- سامانه جمع‌آوری آب‌های مازاد

رواناب تولیدشده از شبیه‌ساز باران و نیز باران مازاد در کف محوطه توسط جوی‌های اطراف فلوم جمع‌آوری و به سه مخزن زیرزمینی منتقل می‌شود. حجم کل این مخازن ۱۴ هزار لیتر است.

۳- مراحل واسنجی شبیه‌ساز باران در شدت‌های مختلف

در این دستورالعمل، ضمن ارائه یک روش گام‌به‌گام برای واسنجی شبیه‌ساز باران در شدت‌های مختلف، نحوه محاسبه شدت واقعی بارش، بررسی یکنواختی باران با شاخص کریستینسن[1]، تحلیل خطاها و ارائه چک‌لیست کنترل کیفیت نیز ارائه شده است. هدف، تدوین الگویی عملی برای استفاده محققان حوزه‌های علوم خاک، منابع طبیعی و مهندسی آب است تا از طریق آن بتوانند با دقت بیشتری به مدیریت داده‌های خود بپردازند.

۳-۱- هدف

- بررسی یکنواختی بارش
- تعیین شدت واقعی بارش در سطح فلوم
- تنظیم ترکیب بهینه نازل‌ها برای دستیابی به توزیع همگن بارندگی و رسیدن به شدت باران موردنظر

۳-۲- تجهیزات موردنیاز

- ظروف جمع‌آوری آب (استوانه‌ای با قطر دهانه ۱۰ سانتی‌متر)
- استوانه مدرج یا ترازو دیجیتال
- تایمر یا کرنومتر دقیق
- دماسنج آب (در صورت نیاز)
- فشارسنج دقیق (مانومتر)

[1] Christiansen

- تراز لیزری یا حبابی
- رایانه با نرم‌افزار Excel برای تحلیل الگوی باران

۳-۳- آماده‌سازی سامانه شبیه‌ساز باران

- بررسی تمیزی و عملکرد نازل‌ها به‌صورت جداگانه
- نصب نازل‌ها در ارتفاع طراحی‌شده (۷/۷۵ متر)
- کنترل ترازبودن فلوم و قاب نگهدارنده نازل
- تنظیم شیب فلوم روی مقدار صفر درصد برای بررسی یکنواختی اولیه

۳-۴- چیدمان ظروف جمع‌آوری

- قراردادن ظروف در سه ردیف، با فاصله ۳۰ سانتی‌متر از یکدیگر، در امتداد طول و عرض فلوم (مطابق شکل ۲)
- اطمینان از قرارگیری عمودی و موازی ظروف با سطح افق

شکل ۲- چیدمان ظروف (الف) و پوشش روی سطح فلوم (ب) برای اندازه‌گیری شدت متوسط بارش

۳-۵- اجرای بارش برای هر نازل

تنظیم فشار آب براساس شدت بارش هدف بر اساس فشار مرجع تعیین‌شده در زمان راه‌اندازی شبیه‌ساز باران که در شدت‌های مختلف از کم تا زیاد (۲۵ تا ۱۳۰ میلی‌متر بر ساعت) مقدار ۱/۵ اتمسفر تعیین شده است (عرب‌خدری و همکاران، ۱۳۸۷).

- فعال‌سازی باران‌ساز و ثبت دقیق زمان بارش (۱۰ دقیقه توصیه می‌شود).
- خاموش‌کردن باران‌ساز و بلافاصله جمع‌آوری ظروف

۳-۶- محاسبه شدت بارندگی

شدت بارش برای هر ظرف با رابطه ۱ محاسبه می‌شود:

$$I = (V / A) / T \qquad (۱)$$

که در آن، I شدت بارندگی (mm/h)، V حجم آب جمع‌آوری شده (ml)، A سطح دهانه ظرف و T مدت زمان بارش (h) است. شدت متوسط بارش از میانگین حسابی حجم بارش در تمامی ظرف‌های مورد استفاده برای جمع‌آوری باران تقسیم بر سطح و زمان محاسبه می‌شود.

۳-۷- محاسبه ضریب یکنواختی کریستینسن (CU)

$$C.U = \left[1 - \frac{\sum_i^n |xi - m|}{m \times n}\right] \qquad (۲)$$

که در آن xi، m و n به‌ترتیب مقدار بارش در هر نقطه، مقدار متوسط بارش و تعداد نقاط نمونه‌برداری است.

۳-۸- مرحله محاسبه‌ای شدت باران اولیه برای هر نازل در Excel

در سامانه‌هایی که از تعدادی نازل برای تولید بارش استفاده می‌شود، نحوه آرایش و چیدمان آن‌ها در شدت و یکنواختی بارش در سطح زمین مؤثر است.

- جمع‌آوری داده‌های شدت مربوط به الگوی بارش هر نازل به‌تنهایی
- ترکیب داده‌های مربوط به چند نازل در محیط Excel برای بررسی همپوشانی مخروط‌های بارش و رسیدن به شدت باران موردنظر

- تنظیم فاصله نازل‌ها به‌طوری که بیشینه یکنواختی در محدوده شش متر طول فلوم حاصل شود.
- استخراج ترکیب بهینه با بیشترین مقدار ضریب یکنواختی

۳-۹- اندازه‌گیری مشاهده‌ای توزیع بارش و محاسبه یکنواختی

در این مرحله، برای ارزیابی یکنواختی بارش در سطح فلوم، از ظروف نمونه‌گیر استوانه‌ای ذکرشده استفاده می شود. هدف اصلی در این مرحله، بررسی یکنواختی بارش در محدوده آزمایش است. پس از بارش و جمع‌آوری حجم آب در هر ظرف، مقدار شدت بارندگی هر نقطه ثبت و میانگین کلی محاسبه می‌شود. سپس براساس مقادیر به‌دست‌آمده، ضریب یکنواختی کریستینسن (CU) محاسبه می‌شود.

علاوه بر محاسبه میانگین کلی شدت بارش به کمک ظرف‌ها، همچنین برای آزمون یکنواختی باران، روی فلوم پوشش پلاستیکی قرار داده و در زمان مشخص حجم باران جمع آوری و در نهایت شدت باران از رابطه (۳) محاسبه شد. این مقدار شدت با مقدار شدت متوسط به دست آماده از ظروفی که در فلوم برای به‌دست‌آوردن یکنواختی قرار داده شده بود، مقایسه شد.

$$I = (V / A) / T \qquad (۳)$$

که در آن، I شدت باران باریده‌شده بر سطح کل فلوم در زمان مشخص (میلی‌متر بر ساعت)، V حجم آب باران باریده بر سطح پوشش پلاستیکی (میلی‌لیتر) و جمع‌شده در انتهای فلوم و A مساحت فلوم (مترمربع) است. شکل ۲، تعیین شدت متوسط ارتفاع باران با دو روش ظرف‌ها و پوشش روی فلوم را نشان می‌دهد. براساس نتایج پژوهشی که Gerami و همکاران (۲۰۲۶) در شبیه ساز باران و فرسایش پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری انجام داده‌اند، درصد اختلاف این رو روش حدود ۱/۱ درصد تعیین شد. در نتیجه انتظار می‌رود، مقدار شدت متوسط به روش ظروف (محاسباتی) و پوشش روی فلوم (مشاهداتی)، کمترین اختلاف را داشته باشند.

۳-۱۰- تحلیل نتایج و تصمیم‌گیری

- اگر CU> ۸۵ درصد، باران یکنواخت و قابل‌قبول است.

- اگر CU< ۸۵ درصد، ترکیب نازل‌ها یا فشار نیاز به تنظیم دارد.
- مقدار بالای این ضریب نشان‌دهنده باران یکنواخت در سطح فلوم است.
- بررسی CV (ضریب تغییرات) جهت کنترل یکنواختی:
- CV کمتر از ۱۰ درصد ایده‌آل و کمتر از ۱۵ درصد قابل‌قبول است (Christiansen، ۱۹۴۲).

۳-۱۱- ثبت نتایج و مستندسازی

- ثبت مقادیر فشار، مدت بارش، حجم جمع‌آوری‌شده در هر ظرف، شدت محاسبه‌شده، CU، CV
- ترسیم نمودار توزیع مکانی بارش در اکسل یا Arc/GIS
- نگهداری مستندات واسنجی برای هر شدت بارندگی آزمایش‌شده

۳-۱۲- توصیه‌ها

- واسنجی برای هر شدت بارندگی به‌صورت مجزا و پیش از هر سری آزمایش تکرار شود.
- در صورت تغییر در نازل‌ها، فشار یا آرایش، واسنجی مجدد الزامی است.
- برای انجام تحقیق جدید و در زمانی که شبیه‌ساز باران مدتی کار نکرده است، به‌دلیل احتمال رسوبگذاری داخل لوله و نازل‌ها، انجام واسنجی ضروری است.
- استفاده از چک‌لیست کنترل کیفیت توصیه می‌شود.

در ادامه، یک نمونه جدول ثبت داده‌ها برای واسنجی باران‌ساز آورده شده است و می‌توان آن را برای هر شدت بارندگی تنظیم کرد.

جدول ۱- فرم ثبت داده‌های واسنجی باران‌ساز در شدت مشخص به‌طور مثال ۶۰ میلی متر بر ساعت

ردیف	شماره ظرف	موقعیت ظرف (X, Y)	زمان بارش (دقیقه)	حجم آب جمع‌شده (ml)	سطح دهانه ظرف (cm^2)	شدت بارندگی محاسبه‌شده (mm/h)	اختلاف با شدت هدف (%)
۱	C1	(۰, ۰)	۱۰	۹۵	۱۰۰	۵۷/۰	-۵/۰
۲	C2	(۰ ,۳۰)	۱۰	۹۲	۱۰۰	۵۵/۲	-۸/۰
۳	C3	(۰ ,۶۰)	۱۰	۹۸	۱۰۰	۵۸/۸	-۲/۰

ردیف	شماره ظرف	موقعیت ظرف (X, Y)	زمان بارش (دقیقه)	حجم آب جمع‌شده (ml)	سطح دهانه ظرف (cm^2)	شدت بارندگی محاسبه‌شده (mm/h)	اختلاف با شدت هدف (%)
...	...	...	...	...	...	...	...
N	C60	(۶۰ ,۱۸۰)	۱۰	۹۴	۱۰۰	۵۶/۴	-۶/۰
	میانگین					۵۷/۲	
	انحراف معیار					۱/۵	
	ضریب تغییرات (CV)					۲/۶ درصد	

۳-۱۳- عوامل مؤثر بر بروز خطا در واسنجی باران‌ساز

فرآیند واسنجی باران‌ساز، با وجود سادگی ظاهری، تحت‌تأثیر مجموعه‌ای از عوامل فنی و محیطی قرار دارد که می‌توانند دقت اندازه‌گیری‌ها و صحت نتایج را کاهش دهند. شناخت و کنترل این عوامل برای تضمین کیفیت داده‌ها ضروری است. مهم‌ترین منابع خطا در فرآیند واسنجی عبارت‌اند از:

۳-۱۳-۱- نوسان فشار آب

فشار آب ورودی نازل‌ها باید در طول آزمایش ثابت باقی بماند. نوسانات لحظه‌ای فشار (به‌ویژه در سیستم‌های متصل به شبکه آب شهری یا پمپ‌های ناپایدار) می‌تواند شدت بارندگی را کاهش یا افزایش دهد. استفاده از مخازن ثقلی با کنترل‌کننده‌های فشار، یا پمپ‌های مجهز به منظم‌کننده[1]، توصیه می‌شود.

۳-۱۳-۲- عدم یکنواختی بارش نازل‌ها

- طراحی نازل، قطر خروجی، ارتفاع نصب و زاویه بارش همگی بر الگوی توزیع بارش اثر دارند.
- نازل‌های مستعمل، رسوب‌گرفته یا دارای انسداد جزئی بارش غیریکسان ایجاد می‌کنند.
- باید به‌صورت دوره‌ای نازل‌ها بررسی و در صورت نیاز تمیز یا تعویض شوند.

[1] regulator

۳-۱۳-۳- خطا در اندازه‌گیری حجم آب جمع‌آوری‌شده

- خطای انسانی در قرائت حجم از استوانه مدرج یا ترازوی دیجیتال ممکن است رخ دهد.
- تبخیر سطحی نیز می‌تواند در شرایط دمایی بالا، به‌ویژه در آزمایش‌های طولانی، حجم نهایی را کاهش دهد.
- توصیه می‌شود قرائت حجم بلافاصله پس از اتمام بارش و در سایه انجام شود.

۳-۱۳-۴- اختلاف سطح و شیب محل آزمایش

- وجود شیب در سطح زمین محل استقرار ظروف باعث ناهمسانی توزیع بارش می‌شود.
- سطح باید کاملاً صاف و تراز باشد تا تمامی ظروف در شرایط مشابهی قرار گیرند.

۳-۱۳-۵- خطا در زمان‌سنجی بارش

- هرگونه تأخیر در شروع یا توقف تایمر نسبت به باز و بسته‌شدن شیر باران‌ساز منجر به محاسبه اشتباه شدت بارندگی می‌شود.
- توصیه می‌شود از تایمر دیجیتال دقیق یا برنامه‌ریزی اتوماتیک استفاده شود.

۳-۱۳-۶- تأثیر باد و جریان هوا

- جریان باد حتی با سرعت کم می‌تواند باعث انحراف الگوی بارش و کاهش یکنواختی شود.
- واسنجی در شرایط بسته‌بودن درب و پنجره‌های آزمایشگاه شبیه‌ساز باران و فرسایش انجام گیرد.

۳-۱۳-۷- اشتباه در محاسبات

- استفاده نادرست از فرمول محاسبه شدت بارندگی، اشتباه در تبدیل واحدها (میلی‌لیتر، سانتی‌مترمربع، ساعت)، یا واردکردن سطح دهانه ناصحیح می‌تواند شدت را به اشتباه نشان دهد.
- بررسی مجدد فرمول‌ها و استفاده از صفحه اکسل محاسباتی توصیه می‌شود.

در جدول ۲ چک‌لیست کنترل کیفیت پیش از واسنجی باران‌ساز آورده شده است.

جدول ۲- چک‌لیست کنترل کیفیت پیش از واسنجی باران‌ساز

ردیف	مورد بررسی	شرح وضعیت مطلوب	نتیجه بررسی	توضیحات
۱	فشار آب	فشار ثابت و یکنواخت مطابق با شدت هدف (براساس مانومتر یا رگولاتور)	مطلوب ☐ نامطلوب☐	
۲	تمیزی نازل‌ها	نازل‌ها فاقد انسداد یا رسوب؛ بارش یکنواخت	مطلوب ☐ نامطلوب☐	
۳	ارتفاع نصب نازل‌ها	ارتفاع دقیق و یکسان نسبت به سطح آزمایش (طبق طراحی)	مطلوب ☐ نامطلوب☐	
۴	پایداری دمای آب	دمای آب متناسب با شرایط محیطی، بدون نوسان ناگهانی	مطلوب ☐ نامطلوب☐	
۵	ترازبودن سطح آزمایش	محل آزمایش کاملاً افقی با خط تراز (یا لیزری)	مطلوب ☐ نامطلوب☐	
۶	استقرار صحیح ظروف جمع‌آوری آب	ظروف در مکان‌های مشخص، بدون جابجایی یا لغزش	مطلوب ☐ نامطلوب☐	
۷	بدون باد در محیط آزمایش	آزمایش در فضای بسته یا شرایط آرام جوی انجام می‌شود	مطلوب ☐ نامطلوب☐	
۸	آماده‌بودن تایمر دقیق	تایمر/کرنومتر تنظیم‌شده و هم‌زمان با شروع بارش آغاز می‌شود	مطلوب ☐ نامطلوب☐	
۹	اطمینان از بدون نشتی‌بودن سامانه	عدم وجود نشت از اتصالات، شلنگ‌ها یا شیرها	مطلوب ☐ نامطلوب☐	
۱۰	کالیبره بودن ظروف اندازه‌گیری حجم	ظروف مدرج و ترازو کالیبره و تمیز هستند	مطلوب ☐ نامطلوب☐	
نام مسئول اجرا: ..... تاریخ: ..... نام آزمایش: ..... شدت هدف (mm/h): ..... تعداد ظروف:				

نتیجه‌گیری

واسنجی دقیق شبیه‌ساز باران نقش تعیین‌کننده‌ای در صحت و قابلیت اعتماد داده‌های حاصل از مطالعات فرسایش و رواناب ایفا می‌کند. نتایج واسنجی انجام‌شده بر روی باران‌ساز پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری نشان داد که دستگاه در شرایط تنظیم بهینه فشار و ارتفاع نازل قادر است شدت بارندگی هدف را با خطای ناچیز تأمین کند و ضریب یکنواختی پاشش در محدوده قابل قبول آزمایشگاهی قرار گیرد. مقادیر محاسبه‌شده ضریب یکنواختی (CU) بیانگر توزیع مناسب بارش در سطح فلوم بوده و ضریب تغییرات (CV) نیز نشان‌دهنده نوسان محدود داده‌ها و پایداری عملکرد سامانه است. این نتایج حاکی از آن است که سامانه باران‌ساز، در

صورت رعایت تنظیمات عملیاتی، قابلیت تولید بارش مصنوعی قابل اعتماد برای آزمایش‌های هیدرولوژیکی و فرسایش خاک را دارد.

با پیروی از یک دستورالعمل گام‌به‌گام و در نظر گرفتن عوامل مؤثر بر خطا، می‌توان به شدت بارندگی مطلوب و یکنواختی مناسب در شرایط مختلف دست یافت. همچنین استفاده از چک‌لیست‌های پیش از اجرا و کنترل مستمر فشار، ارتفاع و زمان‌بندی، می‌تواند به کاهش خطاهای احتمالی کمک کند. این دستورالعمل می‌تواند به‌عنوان یک الگوی استاندارد برای واسنجی شبیه‌ساز پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری در مطالعات علمی و پروژه‌های کاربردی مورد استفاده قرار گیرد و امکان مقایسه‌پذیری داده‌ها بین مطالعات مختلف را افزایش دهد.

پیشنهادهای کلیدی:

- توصیه می‌شود واسنجی سامانه پیش از هر سری آزمایش و پس از هرگونه تغییر در نازل، فشار یا آرایش دستگاه تکرار شود تا پایداری یکنواختی حفظ شود.
- پیشنهاد می‌شود بانک داده‌ای از نتایج واسنجی در شرایط مختلف عملیاتی ایجاد شود تا امکان انتخاب سریع تنظیمات بهینه برای سناریوهای آزمایشی گوناگون فراهم شود.

منابع مورد استفاده

- عرب‌خدری، م. و همکاران. ۱۳۸۷. طراحی و ساخت شبیه‌ساز باران برای بررسی فرسایش خاک. پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، ۷۴ صفحه.
- Cerdà, A., Iserloh, T., Welter, M., Echeverría, M. T., Auernhammer, H., Keesstra, S., & Prosdocimi, M. 2016. Comparative analysis of initial soil erosion processes in European and Chinese loess soils. Solid Earth, 7: 983–996.
- Christiansen, J.E. 1942. Irrigation by Sprinkling. University of California Agricultural Experiment Station Bulletin n. 670: 124.

- Gerami, Z., Karimi, A., Arabkhedri, M., Asadi, H., & Cavalli, M. 2026. Investigating the spatial variations of sediment connectivity index in bare tilled soils with a new weighting factor for the plot scale. Soil and Tillage Research, 255: 106819.
- Iserloh, T., Ries, J. B., Arnáez, J., Boix-Fayos, C., Butzen, V., Cerdà, A., ... & Wirtz, S. 2016. European small portable rainfall simulators: A comparison of rainfall characteristics. Catena, 147: 688–693. https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.05.013
- Iserloh, T., Ries, J. B., Cerdà, A., Echeverría, M. T., Fister, W., Geißler, C., Kuhn, N. J., León, F. J., Peters, P., Schindewolf, M., Schmidt, J., Scholten, T., Seeger, M., & Wirtz, S. 2013. Comparative measurements with seven rainfall simulators on uniform bare fallow land. Zeitschrift für Geomorphologie, Supplementary Issues. 57(1): 11–26.
- Klik, A., & Rosner, J. 2020. Long-term soil erosion monitoring in Austria: Impacts of land use change, conservation measures and climate change. Soil and Tillage Research, 202: 104653.
- Miller, S. N., Bentrup, G., & Dobre, M. 2020. Hydrologic and erosion processes investigated with rainfall simulators. Journal of Environmental Quality, 49(6): 1459–1470. https://doi.org/10.1002/jeq2.20118
- Nunes, J. P., Seeger, M., & Keizer, J. J. 2017. Soil erosion, runoff and connectivity under rainfall simulation experiments: A review. Earth-Science Reviews. 171: 1–18. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.05.005
- Ries, J. B., Iserloh, T., Seeger, M., & Rodrigo Comino, J. 2021. Rainfall simulation in geomorphology: Theory and practice. Springer Nature, 248 pages.
- Seutloali, K. E., & Beckedahl, H. R. 2015. Understanding the factors influencing rill erosion on roadcuts in the south-eastern region of South Africa. Solid Earth, 6: 633–641.

Abstract

Rainfall simulators are key tools in studies related to soil erosion, surface runoff, and water and soil resources management. To ensure the accuracy and reliability of data obtained from these devices, calibration is considered an essential step prior to any experiment. This guideline presents a step-by-step method for calibrating a rainfall simulator at different rainfall intensities. In this approach, actual rainfall intensity was determined by collecting water in designated containers and calculating it based on volume, collection area, and rainfall duration. After arranging the collectors, rainfall from each nozzle was applied, and rainfall intensity as well as rainfall uniformity were calculated and analyzed using the Christiansen Uniformity Coefficient (CU). Subsequently, the initial rainfall intensity of each nozzle was calculated in Excel, and combined nozzle data were analyzed in Excel to evaluate the overlap of spray cones and achieve the target rainfall intensity. It should be noted that calibration must be performed prior to each experimental run. Potential error sources, including water pressure fluctuations, surface slope, timing inaccuracies, and wind effects, were also identified and documented. This guideline can serve as a practical reference for researchers and practitioners in calibrating rainfall simulators.

Keywords: Christiansen uniformity coefficient, Laboratory errors, Rainfall uniformity, Soil erosion, Soil loss.

Ministry of Agriculture-Jahad
Agricultural Research, Education and Extension Organization
Soil Conservation and Watershed Management Research Institute

Title: Calibration of the rainfall simulator tower at the Soil Conservation and Watershed Management Research Institute for generating different rainfall intensities
Authors: Zahra Gerami, Reza Bayat
Editor: Saeed Nabipay Lashkarian
Document Formatting: Abbas Seddigh
Publisher: Soil Conservation and Watershed Management Research Institute
Circulation: 10 Copies
Date of publication: Spring 2026
This scientific work has been registered with the series number of **69169** at the date of **2026-04-22** the Agriculture Information and Scientific Documents Center. All rights reserved. No part of this publication may be reproduced or translated without the original reference.

Ministry of Agriculture-Jahad
A Agricultural Research, Education and Extension Organization
Soil Conservation and Watershed Management Research Institute

Technical Guidline:

Calibration of the rainfall simulator tower at the Soil Conservation and Watershed Management Research Institute for generating different rainfall intensities

Authors:
Zahra Gerami, Reza Bayat

Series number: 69169

2026

Minstry of Agriculture - Jahad
Agriculture Research, Education and Extention Organization
Soil Conservation and Watershed Management Research Institute

Technical Guideline

Calibration of the rainfall simulator tower at the Soil Conservation and Watershed Management Research Institute for generating different rainfall intensities

Authors:
Zahra Gerami, Reza Bayat

Series Number: 69169

2026