

## آزمایشگاه شبیه‌ساز باران و فرسایش پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری معرفی ویژگی‌ها، قابلیت‌ها و کاربردها

مجید محمودآبادی

استادیار بخش مهندسی خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان  
کرمان، بلوار ۲۲ بهمن، دانشگاه شهید باهنر، دانشکده کشاورزی، گروه مهندسی خاکشناسی  
E.mail: mmahmoodabadi@yahoo.com

محمود عرب‌خدری

عضو هیات علمی، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری  
تهران، کیلومتر ۱۰ جاده مخصوص کرج، صندوق پستی: ۱۳۴۴۵-۱۱۳۶  
Email: arabkhedri@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۸۹/۱۲/۲۶

تاریخ دریافت: ۸۹/۳/۲۵

### چکیده

شبیه‌سازی باران بطور وسیعی برای شناخت فرسایش خاک و فرآیندهای مربوط به آن مورد استفاده قرار می‌گیرد. اخیراً در پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، آزمایشگاهی برای شبیه‌سازی باران و فرسایش ساخته است که از بسیاری جنبه‌ها، متفاوت از سایر انواع موجود در کشور می‌باشد. این شبیه‌ساز از قسمت‌های مختلفی شامل: سامانه آبرسانی، صفحه بارش، فلوم شیب‌پذیر، سامانه جمع‌آوری و ذخیره آب مازاد، اتاق کنترل و آزمایشگاه جانبی تشکیل شده است. صفحه بارش دارای ۶ عدد نازل با قطر روزنه ۴/۵ میلی‌متر است که از ارتفاع ۷/۷۵ متر از سطح فلوم، مخروطی از بارش با دامنه‌ای از اندازه قطرات مختلف ایجاد می‌کند. در این شبیه‌ساز، شدت بارندگی از طریق تنظیم فشار آب و تعداد نازل‌های فعال، فاصله و چیدمان آنها کنترل می‌شود. فلوم موجود در این آزمایشگاه به ابعاد یک در شش متر بوده که دارای سامانه تولید رواناب با دبی مشخص، سیستم زهکش، جک و پاورپک برای کنترل شیب تا ۶۰ درصد و قیف جمع‌آوری نمونه رواناب و زهکش در انتهای فلوم است. قطر و توزیع اندازه قطرات به روش گلوله آرد، یکنواختی شدت با استفاده از ضریب کریستین‌سن و نیز سرعت و انرژی جنبشی باران بر اساس دو سناریوی مختلف تعیین گردید. نتایج نشان داد که شدت‌های بین ۳۵ تا ۱۲۵ میلی‌متر در ساعت با ضریب یکنواختی بیش از ۹۰ درصد قابل شبیه‌سازی است. میان قطر قطرات تولید شده در شدت‌های مختلف، بین ۱/۶۴ تا ۲/۱۵ میلی‌متر و سرعت حد آنها از ۵/۷۰ تا ۶/۷۸ متر بر ثانیه نوسان دارد. همچنین، انرژی جنبشی بین ۱۶/۲۴ تا ۲۲/۹۷ ژول بر متر مربع در میلی‌متر باران متغیر است. سیستم یادشده قابلیت شبیه‌سازی باران و رواناب به طور مجزا و یا همزمان را دارد. از این روست که بررسی فرسایش ناشی از باران و یا رواناب را در شرایط کنترل‌شده آزمایشگاهی میسر می‌سازد.

واژه‌های کلیدی: شبیه‌سازی باران و رواناب، نازل تحت فشار، فلوم شیب‌پذیر، فرسایش خاک.



## مقدمه

بارندگی در مناطق کشاورزی ( Schiettecatte et al., 2005) می‌باشد. در شرایط صحرایی، شبیه‌سازی باران برای کمی‌سازی فرآیندهای رواناب و فرسایش کاربرد دارد (Stroosnijder, 2005). برای تعیین عوامل منفرد مؤثر بر رواناب و فرسایش، شبیه‌سازی باران در شرایط آزمایشگاهی نیز مناسب می‌باشد (Hamed ET AL., 2002; Gomez and Nearing, 2005). به‌علاوه لزوم اندازه‌گیری فرسایش به منظور ارزیابی آن نه تنها از طریق پایش بلند مدت، بلکه با استفاده از شبیه‌سازی باران و در پایه‌های کوتاه‌مدت مورد توجه قرار گرفته است (Stroosnijder, 2005).

اگر چه هیچ دو باران طبیعی کاملاً مشابه نیستند، معیارهای مهم برای شبیه‌سازی باران شامل: توزیع اندازه قطرات مشابه باران طبیعی، برخورد قطرات به سطح زمین با سرعت حد، زاویه برخورد عمودی قطرات با سطح خاک، شدت باران یکنواخت و توزیع تصادفی اندازه قطرات، بارندگی یکنواخت بر تمام سطح مورد آزمایش، قابلیت تولید مجدد الگوهای بارش، قابلیت حمل و بردن آسان دستگاه شبیه‌ساز به صحرا می‌باشد (Meyer, 1994; Blanquies et al., 2003). بطور کلی شبیه‌سازهای باران شامل دو نوع قطره‌ساز<sup>۱</sup> و نازل تحت فشار<sup>۲</sup> می‌باشند (Morgan, 1995; Meyer, 1994). در نوع اول، قطرات بدون سرعت اولیه و تنها در اثر نیروی ثقل سقوط می‌کنند. لذا، نیاز به ارتفاع زیادی داشته تا قطرات به سرعت حد برسند. به علاوه، این شبیه‌سازها قادر به ایجاد توزیع مناسبی از دامنه اندازه قطرات نیستند. در شبیه‌سازهای تحت فشار، قطرات دارای سرعت اولیه بوده بنابراین، در مقایسه با شبیه‌سازهای نوع اول برای رسیدن به سرعت حد، به ارتفاع کمتری نیاز دارند. همچنین این شبیه‌سازها، قابلیت تغییر شدت بارندگی را در دامنه نسبتاً بیشتری دارند (Meyer, 1994).

اندازه قطرات، انرژی جنبشی، یکنواختی توزیع و شدت باران در شبیه‌سازها بطور گسترده‌ای مورد آزمایش و مقایسه با باران‌های طبیعی قرار گرفته است (Humphry et al., 2002). یکی از معیارهای شبیه‌سازی مطلوب باران، توزیع مناسب اندازه قطرات است. اندازه قطرات باران‌های

با توجه به نقش مخرب فرسایش در کاهش تولیدات کشاورزی و منابع طبیعی (Pla, 2003; Roose, 2003) و پیامدهای زیست محیطی آن (Bajracharya et al., 1992; Sharpley and Kleinman, 2003) انجام فعالیت‌های گسترده از جنبه‌های تحقیقات و اجرا ضروری است. در این راستا، شبیه‌سازی باران به طور وسیعی در شناخت فرسایش و فرآیندهای مربوط به آن مورد استفاده قرار گرفته است (روحی‌پور و همکاران، ۱۳۸۴؛ محمودآبادی و همکاران، ۱۳۸۶ a؛ Veihe et al., 2001; Victora et al., 1998). این در حالیست که ایران از نظر پژوهش در این زمینه کشوری جوان محسوب می‌شود. طراحی و ساخت دستگاهی که باران‌هایی مشابه باران طبیعی تولید نماید، بدون شناخت عوامل مؤثر در فیزیک باران، میسر نیست. با توجه به وضعیت بحرانی فرسایش در ایران، اخیراً در محل پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری برای شبیه‌سازی باران و فرسایش، آزمایشگاهی ساخته شده که از بسیاری جنبه‌ها متفاوت از سایر انواع موجود در کشور می‌باشد. مقاله حاضر به معرفی این آزمایشگاه و تشریح ویژگی‌ها، قابلیت‌ها و کاربردهای آن می‌پردازد.

مهمترین مزایای استفاده از شبیه‌سازی باران، سرعت در عمل، کارایی، قابلیت کنترل و انعطاف‌پذیری بیشتر آن نسبت به باران‌های طبیعی است (Meyer, 1994). استفاده از شبیه‌سازی باران در پارامترسازی و واسنجی مدل‌های مبنای فیزیکی کاربرد دارد (Loch et al., 2000; Seeger and Ries, 2002). در اوایل دهه ۱۹۹۰ برای توسعه مدل WEPP یک شبیه‌ساز باران از نوع بازوی دوار استفاده گردید (Sharpley and Kleinman, 2003). برخی تحقیقات در زمینه استفاده از شبیه‌سازی باران شامل بررسی تولید رواناب و فرسایش در شرایط مختلف اقلیمی (Imeson et al., 1998)، تغییر کاربری اراضی (Lasanta et al., 2000)، ساختمان خاک سطحی نظیر سله (Ries et al., 2000; Ries and Langer, 2002; Le Bissonais et al., 2005)، کمی نمودن تأثیر سیستم‌های مدیریتی بر تولید رواناب و نفوذ (Niebes et al., 2001)، بررسی احیای معادن با تأکید بر حساسیت در برابر فرسایش و برای پارامترسازی مدل‌های فرسایش (Loch, 2000; Loch et al., 2000) و مطالعه تغییر در خصوصیات خاک در اثر

1 . Drop-forming simulators  
2 . Pressurized nozzle simulators

شبيه‌سازی شده، روش گلوله آردی استفاده شد. این روش در سه گام شامل: ۱) ایجاد قطرات مصنوعی با اندازه مشخص، ۲) چکاندن قطرات مصنوعی از ارتفاع ۹ متر و تهیه منحنی واسنجی بر اساس رابطه بین جرم گلوله آرد و قطر قطره و ۳) نمونه‌گیری از باران در شدت‌های مختلف و تعیین اندازه و توزیع اندازه قطرات صورت گرفت. نمونه‌گیری در شش نقطه از طول فلوم به فواصل یک متر و در سه تکرار برای شدت‌های مختلف باران شبيه‌سازی انجام شد.

بر حسب فشار آب، تعداد نازل‌های فعال و فاصله و آرایش آنها، ترکیب‌های مختلف باران ایجاد شد. در هر مورد، شدت باران با چیدن ۶۰ ظرف لبه تیز در کف فلوم اندازه‌گیری شد. برای ارزیابی یکنواختی بارش از ضریب یکنواختی کریستینسن<sup>۲</sup> استفاده گردید. این ضریب (C.C) با استفاده از شدت اندازه‌گیری شده در هر ظرف (xi)، شدت متوسط (m) و تعداد ظروف (n) از فرمول زیر تعیین شد (Solomon, 1979):

$$C.C = \left[ 1 - \frac{\sum |xi - m|}{m.n} \right] \times 100 \quad (1)$$

با توجه به اینکه قطرات باران شبيه‌سازی شده دارای سرعت اولیه بوده و همچنین اندازه‌های متفاوتی نیز دارند، با امکانات موجود، شرایط اندازه‌گیری سرعت سقوط نهایی فراهم نبود. در این تحقیق، دو حالت مد نظر قرار گرفت، در حالت اول با توجه به ارتفاع صفحه بارش از سطح فلوم و تحت فشار بودن آب سیستم، می‌توان فرض کرد که قطرات به سرعت حد می‌رسند. با استفاده از جداول لاوز (Laws, 1941) و همچنین میانه قطر قطرات در هر شدت، سرعت نهایی قطرات برآورد گردید. در حالت دوم با فرض اینکه قطرات فاقد سرعت اولیه باشند، با استفاده از قطر میانه قطرات (جرم قطره) در هر شدت باران شبيه‌سازی شده و ارتفاع صفحه ریزش (۷/۷۵ متر از سطح فلوم) محاسبه گردید که قطرات به چند درصد از سرعت نهایی خود (حاصل از حالت اول) می‌رسند. همچنین با داشتن سرعت، میانه قطر قطره (جرم قطره) و تعداد قطرات، انرژی باران در هر شدت برآورد گردید.

طبیعی از حدود صفر تا ۶ میلی‌متر متغیر است (Meyer, Morgan, 1995; 1994) و معمولاً با افزایش شدت بارندگی، میانه قطر به سمت قطرات درشت‌تر میل می‌کند (Morgan, 1995). معمولاً سرعت حد قطرات در باران‌های طبیعی با افزایش اندازه قطره، افزایش یافته و به حدود ۹ متر بر ثانیه می‌رسد (Eigel and Moore, 1983). در شبيه‌سازی‌های باران، سرعت برخورد قطرات با سطح خاک تابعی از اندازه، ارتفاع صفحه بارش و سرعت اولیه قطرات است. نتایج بررسی قطرات دارای سرعت حد، نشان از همبستگی بالای انرژی باران با شدت آن داشته است (Kinnell, 1981). از این رو دستیابی به شدت‌های نزدیک به باران طبیعی در صورتی که قطرات به سرعت حد رسیده باشند، قابلیت شبيه‌سازی انرژی جنبشی باران را نیز در کنار سایر معیارها ممکن می‌سازد.

نوع نازل در خصوصیات باران شبيه‌سازی شده تأثیر مهمی دارد. دو نوع متداول نازل شامل: نازل نوع Fulljet و Veejet به ترتیب با سطح پاشش دایره‌ای و بادبزی می‌باشد. نازل‌های نوع Fulljet معمولاً به صورت ثابت و در حالت بارش مداوم استفاده می‌گردند (Tossell et al., 1990; Poesen et al., 1990). نازل‌های Veejet در شبيه‌سازی‌های باران که پاشش ناپیوسته دارند، استفاده می‌شود. بنابراین سطح مورد آزمایش به طور متناوب و نه مداوم، باران دریافت می‌نماید. (Meyer and Harmon, 1979; Agassi and Bradford, 1999). در این موارد، بین پاشش‌های متناوب باران، زمان تأخیری<sup>۱</sup> بسته به نوع شبيه‌ساز و شدت باران وجود دارد. در شدت‌های مساوی بارندگی، انرژی جنبشی باران در واحد زمان برخورد قطره، در مورد نازل‌های با پاشش متناوب بیشتر از نازل‌های با پاشش مداوم است (Agassi and Bradford, 1999).

## مواد و روش‌ها

در آذر سال ۱۳۸۳ آزمایشگاه شبيه‌ساز باران و فرسایش پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری راه‌اندازی شد. در ادامه، طی چند مرحله واسنجی بارش و تکمیل نهایی آن انجام گردید (محمودآبادی و همکاران، ۱۳۸۶). در این راستا، برای اندازه‌گیری قطر قطرات باران

2. Christiansen coefficient of uniformity

1. Delay time

## بحث

## آزمایشگاه شبیه‌ساز باران و فرسایش: ویژگی‌ها و قابلیت‌ها

دستگاه شبیه‌ساز باران و فرسایش پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری کشور از ویژگی‌های منحصر به فردی برخوردار است. تحت فشار بودن آب سیستم، پراکنش مناسب اندازه قطرات، برخورد قطرات به سطح خاک با سرعت نزدیک به حد، یکنواختی بارش در تمامی سطح فلووم، سقوط قطرات با زاویه عمود بر سطح زمین،

قابلیت تولید مجدد الگوی بارش (بین ۳۵ تا ۱۲۵ میلی‌متر در ساعت)، امکان تعویض و افزایش تعداد نازل‌ها، شیب‌پذیری فلووم تا شیب ۶۰ درصد، ایجاد باران از ارتفاع حدود ۸ متر روی فلوومی به طول شش متر و پهنای یک متر و قابلیت شبیه‌سازی باران و رواناب به طور مجزا و یا همزمان، از جمله محاسن این شبیه‌ساز است (محمودآبادی و همکاران، ۱۳۸۶ b). شکل ۱ نمایی از این آزمایشگاه را نشان می‌دهد. در ادامه اجزا و مشخصات هر یک از قسمت‌های این آزمایشگاه، تشریح می‌شود.



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

## اجزا و قسمت‌های آزمایشگاه شبیه‌ساز باران و فرسایش

## سیستم آبرسانی:

این بخش شامل یک منبع آب به ظرفیت ۳۰۰۰ لیتر، پمپ‌ها، سیستم لوله‌کشی و آبرسانی تا نازل‌ها، مقسم و تجهیزات اندازه‌گیری فشار و دبی آب است. به منظور کنترل و اندازه‌گیری فشار آب سیستم، فشارسنجی با حداکثر فشار ۰/۲۵ مگاپاسکال، نصب شده است. مقسم مورد استفاده به شکل استوانه تخت و از جنس برنج بوده که از یک ورودی و شش خروجی متقارن و یک اندازه تشکیل شده است. برای هر یک از خروجی‌های مقسم با

استفاده از شیر قطع و وصل، جریان آب ورودی به نازل به طور جداگانه، قابل کنترل است.

## صفحه بارش:

صفحه بارش دارای ۶ عدد نازل است که روی ریلی با مقطع عرضی به شکل دایره و ارتفاع ۷/۷۵ متر از سطح فلووم (۹ متر از کف سالن) نصب شده‌اند. نازل‌ها از نوع BEX-S30W است که قطر روزنه خروجی آنها ۴/۵ میلی‌متر می‌باشد. به علت تحت فشار بودن آب سیستم، قطرات به صورت مخروطی از بارش با توزیعی از اندازه قطرات ریز تا درشت تولید می‌شوند. قطرات دارای سرعت اولیه بوده و با زاویه‌ای که بستگی به میزان فشار آب دارد، از نازل به

مرحله‌ای هرزآب در مخازن زیرزمینی، آب بازیافتی به وسیله پمپ آب سپتیک برای آبیاری فضای سبز، مورد استفاده قرار می‌گیرد. به این ترتیب، از تلفات آب جلوگیری به عمل می‌آید. همچنین می‌توان از آن برای تولید جریان رواناب در بالادست فلوم، استفاده نمود.

#### چهارچوب اصلی و پوشش شبیه‌ساز:

چهارچوب اصلی سالن آزمایشگاه، از نوع قاب صلب بوده که برخی از اجزای سیستم، روی آن قرار گرفته‌اند. برای جلوگیری از تأثیر باد و عوامل محدودکننده دیگر، پوشش دوجداره فلزی روی این چهارچوب نصب شده است (شکل ۱). این پوشش به شکل مکعب مستطیل به طول ۱۰ متر، عرض ۵ متر و ارتفاع ۱۱/۲۵ متر با سقف شیروانی می‌باشد.

#### اتاق کنترل و آزمایشگاه جانبی:

به منظور کنترل مراحل مختلف شبیه‌سازی باران، یک اتاق در مجاورت سالن شبیه‌ساز احداث شده است که در آن برخی از آزمایش‌های اولیه روی نمونه‌های رواناب و رسوب انجام می‌گیرد. به علاوه، کنترل برق سیستم، تأمین روشنایی، فعال‌نمودن پمپ‌ها و تنظیم مدت بارش از طریق یک صفحه کلید که در این اتاق قرار دارد، صورت می‌پذیرد.

بیرون پرتاب می‌شوند. فواصل بین نازل‌ها برای تنظیم شدت بارندگی و الگوهای مختلف آن، قابل تغییر است. نازل‌ها روی ریل بارش به صورت کشویی و متحرک نصب شده‌اند.

برای تنظیم شدت بارندگی، از ترکیب سه پارامتر استفاده شد که شامل: فشار آب، تعداد نازل فعال و فاصله بین آنها (چیدمان) است. به این ترتیب، می‌توان شدت‌های مختلفی از باران با خصوصیات متفاوت را تولید نمود. از آنجا که در این شبیه‌ساز از چند نازل استفاده می‌شود، تعداد نازل در حال بارش (نازل فعال) به طور همزمان بین ۲ تا ۶، فشار آب با توجه به تعداد نازل فعال تا ۰/۱۵ مگاپاسکال و فواصل نازل‌ها در موقعیت‌های مختلف روی ریل بارش، متغیر و قابل تنظیم است. به عبارتی، ترکیب‌های متنوعی از شدت باران بسته به هدف، قابل شبیه‌سازی است.

#### صفحه فلوم شیب‌پذیر!

برای بررسی رفتار خاک در برابر بارندگی یا جریان رواناب، فلومی به طول شش متر و پهنای یک متر روی شاسی فلزی، نصب شده است. شکل ۲ نمایی از فلوم شیب‌پذیر را در داخل سالن آزمایشگاه نشان می‌دهد. دیواره‌ها و کف فلوم از جنس پلکسی‌گلاس بوده که روی یک شاسی فلزی نصب شده است. شیب فلوم توسط یک بالابر هیدرولیکی تا ۶۰ درصد قابل تنظیم است. نیروی لازم برای این کار با استفاده از یک سامانه هیدرولیک تأمین می‌شود. پس از تنظیم شیب فلوم، به کمک گیره‌هایی قلاب‌مانند، ثابت نگه داشته می‌شود. به منظور شبیه‌سازی جریان رواناب، سامانه تولید رواناب مشتمل بر مخزن رواناب با ارتفاع ثابت آب، حوضچه آرامش و شیرهای تنظیم دبی رواناب ورودی به فلوم و آرام‌کننده جریان و سرریز انتهایی در ابتدای فلوم نصب شده است. در انتهای فلوم، یک قیف برای جمع‌آوری نمونه رواناب و رسوب، تعبیه شده است.

#### سامانه جمع‌آوری و ذخیره آب مزاد:

هرزآب حاصل از آزمایش‌های شبیه‌سازی باران و رواناب، از طریق کانال‌هایی که در اطراف فلوم تعبیه شده است، جمع‌آوری و به مخازن سه‌گانه زیرزمینی با حجم کل ۱۴۰۰۰ لیتر منتقل می‌شود. پس از رسوبگذاری سه



شکل ۴. نمایی از فلوم شیب‌پذیر در سالن آزمایشگاه

ولاچ و فولی (Loch and Foley, 1994) در دامنه یک تا حدود ۵ میلی‌متر با حداکثر فراوانی در قطر ۲ تا ۳ میلی‌متر بوده است که همانند باران طبیعی، دامنه وسیعی از قطرات با اندازه‌های متفاوت را در بر می‌گرفت. سردا و همکاران (Cerda et al., 1997) با شبیه‌سازی باران با شدت ۵۷/۱ میلی‌متر در ساعت، میانه اندازه قطرات ۲/۴۹ میلی‌متر را گزارش نموده‌اند.

### خصوصیات باران‌های قابل شبیه‌سازی

#### توزیع اندازه قطرات:

نتایج توزیع اندازه قطرات برای شدت‌های مختلف باران در جدول ۱ ارائه شده است. در این جدول علائم  $D_{25}$ ،  $D_{50}$  و  $D_{75}$  حداکثر اندازه قطره‌ای است که به ترتیب ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد حجمی قطرات باران از آن کوچکتر باشند. میانه قطر قطرات باران شبیه‌سازی‌شده ( $D_{50}$ )، بین ۱/۶۴ تا ۲/۱۵ میلی‌متر بر حسب فشار و آرایش نازل‌ها متغیر است.

در شبیه‌سازی باران با استفاده از سیستم تحت فشار، دامنه‌ای از اندازه قطرات تولید می‌شود. در منابع بسته به نوع و اندازه روزنه نازل و نیز فشار آب، اندازه‌های متفاوتی از قطرات، شبیه‌سازی شده است. در سیستم GUTSR دانشگاه گریفیت استرالیا، شبیه‌سازی با استفاده از شش نازل افشانه‌ای<sup>۱</sup> انجام می‌شود که در شدت ثابت ۱۰۰ میلی‌متر در ساعت از ارتفاع ۹ متر، قطراتی با قطر میانه ۲/۲۴ میلی‌متر تولید می‌نماید (Misra and Rose, 1995). (Rouhipour et al. 2006). اندازه قطرات ایجادشده توسط مایر و هارمون (Meyer and Harmon, 1979)

1. Spray nozzle

جدول ۱: مقادیر متوسط چارک‌های قطر قطرات برای چند شدت مختلف بارندگی

| شماره بارش | متوسط شدت باران<br>( $mm\ h^{-1}$ ) | فشار آب<br>( $MPa$ ) | تعداد نازل<br>فعال | $D_{25}$ | $D_{50}$ | $D_{75}$ |
|------------|-------------------------------------|----------------------|--------------------|----------|----------|----------|
|            |                                     |                      |                    | (mm)     |          |          |
| (۱)        | ۳۳/۵                                | ۰/۰۱                 | ۲                  | ۱/۱۰     | ۱/۹۵     | ۲/۶۶     |
| (۲)        | ۴۲/۱                                | ۰/۰۵                 | ۲                  | ۱/۱۰     | ۱/۶۴     | ۲/۳۴     |
| (۳)        | ۶۸/۷                                | ۰/۰۵                 | ۳                  | ۱/۱۴     | ۱/۸۳     | ۲/۶۰     |
| (۴)        | ۸۸/۷                                | ۰/۰۵                 | ۴                  | ۱/۳۸     | ۲/۰۳     | ۲/۶۶     |
| (۵)        | ۱۲۵/۳                               | ۰/۰۴                 | ۶                  | ۱/۴۴     | ۲/۱۵     | ۲/۷۳     |

### شدت و یکنواختی بارش:

با تنظیم فشار آب، تعداد نازل‌های فعال، فاصله و چیدمان آنها، شدت‌های مختلف قابل شبیه‌سازی است. بر این اساس، شدت‌های بین ۳۵ تا ۱۲۵ میلی‌متر در ساعت با ضریب یکنواختی بیشتر از ۹۰ درصد قابل شبیه‌سازی است. این شدت‌ها دارای بیشترین مقادیر ضریب یکنواختی و کمترین ضریب تغییرات بوده و البته دامنه شدت‌های مورد نیاز برای شبیه‌سازی باران از شدت نسبتاً کم تا زیاد را در بر می‌گیرد. باران‌های با شدت ۱۲ تا ۱۲۰ میلی‌متر در ساعت به طور معمول در طبیعت بیشتر اتفاق می‌افتد و از این رو، بیشترین اهمیت را در مطالعات فرسایش خاک دارند (Meyer and Harmon, 1979). البته در سیستم حاضر، شدت‌های کمتر از ۳۵ میلی‌متر در ساعت نیز قابل شبیه‌سازی بوده ولی ضریب یکنواختی کمتری دارند. به هر روی، دستیابی به شدت‌های با ضریب یکنواختی ۱۰۰ درصد میسر نیست. شلتون و همکاران (Shelton et al., 1985) با استفاده از نازل‌های نوع Fulljet شدت‌های بین ۷۶ تا ۱۶۸ میلی‌متر در ساعت با حداکثر یکنواختی ۸۴ درصد را شبیه‌سازی نمودند. سولومون (Solomon, 1979) عنوان می‌دارد که ضریب یکنواختی بستگی به نوع و اندازه نازل، فشار آب، فاصله بین نازل‌ها و اثر باد دارد. سردا و همکاران (Cerda et al., 1997) حداکثر یکنواختی ۹۳/۲۴ درصد در فشار ۱/۵۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع را برای شدت ۵۵ میلی‌متر در ساعت، گزارش کردند. این محققان علت کاهش ضریب یکنواختی در فشارهای کمتر و بیشتر از فشار یادشده را به توزیع

قطرات باران به ترتیب در مرکز و حاشیه سطح زیر بارش مرتبط دانستند.

### سرعت و انرژی جنبشی باران:

بر اساس نتایج حالت اول، با توجه به تحت فشار بودن آب و ارتفاع قابل توجه صفحه بارش، می‌توان فرض کرد که قطرات به سرعت حد می‌رسند. با این فرض و با استفاده از جدول لاوز (Laws, 1941) و داشتن میانه قطر قطرات، سرعت حد برآورد گردید. جدول ۲ این مقادیر سرعت نهایی را برای چند شدت بارندگی نشان می‌دهد که از ۵/۷۰ تا ۶/۷۸ متر بر ثانیه متغیر است. در حالت دوم می‌توان فرض کرد که قطرات بدون سرعت اولیه (حذف عامل فشار آب) سقوط می‌کنند. در این حالت، نتایج نشان داد که سرعت سقوط قطرات در شدت‌های مختلف به ۹۶ تا ۹۹ درصد سرعت حد آنها (حاصل از حالت اول) می‌رسد. به عبارتی حتی اگر قطرات فاقد سرعت اولیه باشند در حین برخورد با سطح فلوم، سرعتی بسیار نزدیک به سرعت حد خود دارند. با در نظر گرفتن سرعت اولیه قطرات، فرض مربوط به حالت اول (رسیدن قطرات به سرعت حد) پذیرفته می‌شود. آقاسی و برادفورد (Agassi and Bradford, 1999) نیز عنوان داشتند که قطراتی با قطر ۲ تا ۶ میلی‌متر برای رسیدن به سرعت حد، به ارتفاعی حدود ۲۰ متر نیاز دارند با این وجود، تنها ارتفاع ۸ متر لازم است تا قطرات به ۹۵ درصد سرعت حد خود برسند.

جدول ۴ سرعت و انرژی جنبشی باران در پنج شدت مختلف بارندگی

| شماره بارش | متوسط شدت باران<br>( $mm\ h^{-1}$ ) | میانگین قطر قطرات<br>( $mm$ ) | سرعت برخورد با سطح فلوم<br>( $m\ s^{-1}$ ) | انرژی جنبشی باران (۲)<br>( $J\ m^{-2}\ mm^{-1}$ ) |
|------------|-------------------------------------|-------------------------------|--|---|
| (۱)        | ۳۳/۵                                | ۱/۹۵                          | ۶/۳۹                                       | ۲۰/۴۳   |
| (۲)        | ۴۲/۱                                | ۱/۶۴                          | ۵/۷۰                                       | ۱۶/۲۴   |
| (۳)        | ۶۸/۷                                | ۱/۸۳                          | ۶/۱۴                                       | ۱۸/۸۴   |
| (۴)        | ۸۸/۷                                | ۲/۰۳                          | ۶/۵۵                                       | ۲۱/۴۷   |
| (۵)        | ۱۲۵/۳                               | ۲/۱۵                          | ۶/۷۸                                       | ۲۲/۹۷   |

(۱) با فرض رسیدن قطرات به سرعت حد

(۲) با استفاده از رابطه  $E = \frac{1}{2} MV^2$  محاسبه شده است.

تعداد نازل‌ها، شیب‌پذیری فلوم تا شیب ۶۰ درصد، ایجاد باران از ارتفاع حدود ۸ متر روی فلومی به طول شش متر و پهنای یک متر و قابلیت شبیه‌سازی باران و رواناب به طور مجزا و یا همزمان، از جمله محاسن این شبیه‌ساز است. به رغم وجود این مزایا، برخی برنامه‌های تکمیلی که لازم است در طرح‌های توسعه این سیستم مد نظر قرار گیرند، عبارتند از: ساخت دستگاه نوسان‌ساز ریل بارش برای افزایش ضریب یکنواختی، قابلیت برنامه‌ریزی برای ایجاد شدت‌های مختلف و قطع و وصل باران به طور خودکار طبق برنامه کامپیوتری، امکان تعویض نوع نازل‌ها برای دستیابی به شدت‌های کمتر، ساخت و نصب سیستم قطع و وصل قابل تنظیم نازل‌ها برای ایجاد شدت‌های کمتر، افزایش فشار آب با تعویض پمپ و الکتروموتور به منظور ایجاد شدت‌های بیشتر، افزایش طول فلوم و امکان ایجاد شیب‌های مرکب. این آزمایشگاه بررسی گسترده فرسایش ناشی از باران و یا رواناب در شرایط کنترل شده را میسر می‌سازد.

### سپاسگزاری

از مسئولین محترم پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری بخاطر همکاری و مساعدت در اجرای این تحقیق سپاسگزاری می‌گردد.

مطابق جدول ۲ انرژی جنبشی باران در بارش‌های مختلف، بین ۱۶/۲۴ تا ۲۲/۹۷ ژول بر متر مربع در میلی-متر باران متغیر است. میانگین قطر قطرات بارش (۲) نسبت به بارش (۱) کوچکتر است لذا، سرعت سقوط نهایی کمتری دارند. به همین خاطر به رغم شدت بیشتر آن، انرژی جنبشی کمتری را نشان می‌دهد. به عبارتی در یک ترکیب یکسان از چیدمان نازل‌ها با افزایش فشار آب، قطرات ریزتری تولید شده که سرعت سقوط و در نتیجه انرژی جنبشی کمتری دارند. با افزایش تعداد نازل‌های فعال در یک فشار ثابت، به علت تولید قطرات درشت‌تر که سرعت سقوط بیشتری نیز دارند، انرژی جنبشی باران افزایش می‌یابد.

### نتیجه‌گیری

آزمایشگاه شبیه‌ساز باران و فرسایش پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری که بلندترین و بزرگترین شبیه‌ساز ساخته شده در کشور است، از ویژگی‌های منحصر به فردی برخوردار می‌باشد. تحت فشار بودن آب سیستم، پراکنش و توزیع مناسب اندازه قطرات و برخورد قطرات به سطح خاک با سرعت نزدیک به حد، یکنواختی مناسب باران‌هایی با شدت بین ۳۵ تا ۱۲۵ میلی متر در ساعت در تمامی سطح فلوم، سقوط عمودی قطرات، قابلیت تولید مجدد الگوی بارش، امکان تعویض و افزایش



## منابع

۱. روحی پور، ح.، جوادی، پ. و محبوبی، ع. ا. ۱۳۸۴. تأثیر سنگریزه بر روی فرسایش و رسوب دو نوع خاک با استفاده از فلوم و شبیه سازی باران. مجموعه مقالات سومین همایش ملی فرسایش و رسوب، ۶ ۹ شهریور، تهران. صص. ۷۱۶-۷۲۱.
۲. محمودآبادی، م.، چرخابی، ا. ح. و رفاهی، ح. ق. ۱۳۸۶ a. بررسی تأثیر برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک بر تولید رواناب و رسوب با استفاده از شبیه ساز باران. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی، جلد ۸، شماره ۲. صص. ۱۶-۱۶.
۳. محمودآبادی، م.، روحی پور، ح.، عرب خدری، م. و رفاهی، ح. ق. ۱۳۸۶ b. واسنجی، توزیع مکانی و خصوصیات بارش های شبیه سازی شده، مطالعه موردی: شبیه ساز باران مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری. مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران. جلد ۱، شماره ۱، صص. ۳۹-۵۰.
4. Agassi, M. and J.M. Bradford. 1999. Methodologies for interrill soil erosion studies. *Soil Tillage Res.* 49: 277-287.
5. Bajracharya, R. M., W.J. Elliot and R. Lal. 1992. Interrill erodibility of some Ohio soils based on field rainfall simulation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 56: 267-272.
6. Blanquies, J., M. Scharff and B. Hallock. 2003. The design and construction of a rainfall simulator. International Erosion Control Association (IECA), 34<sup>th</sup> annual conference and expo. Las Vegas, Nevada.
7. Cerda, A., S. Ibanez and A. Calvo. 1997. Design and operation of a small and portable rainfall simulator for rugged terrain. *Soil Tech.* 11: 163-170.
8. Eigel, J.D. and I.D. Moore. 1983. A simplified technique for measuring raindrop size and distribution. *Trans. ASAE.* 26: 1079-1084.
9. Gomez, J.A. and M.A. Nearing. 2005. Runoff and sediment losses from rough and smooth soil surfaces in a laboratory experiment. *Catena*, 59: 253-266.
10. Hamed, Y., J. Albergel, Y. Pepin, J. Asseline, S. Nasri, P. Zante, R. Berndtsson, M. El-Niazy and M. Balah. 2002. Comparison between rainfall simulator erosion and observed reservoir sedimentation in an erosion sensitive semiarid catchment. *Catena*, 50: 1-16.
11. Humphry, J.B., T.C. Daniel, D.R. Edwards and A.N. Sharpley. 2002. A portable rainfall simulator for plot-scale runoff studies. *Appl. Eng. Agric.*, 18: 199-204.
12. Imeson, A.C., H. Lavee, A. Calvo and A. Cerda. 1998. The erosional response of calcareous soils along a climatological gradient in southeastern Spain. *Geomorphol.*, 24: 3-16.
13. Kinnell, P.I.A. 1981. Rainfall intensity- kinetic energy relationships for soil loss prediction. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45: 153-155.
14. Lasanta, T., J.M. Garcia-Ruiz, C. Perez-Rontome and C. Sancho-Marcen. 2000. Runoff and sediment yield in a semi-arid environment: the effect of land management after farmland abandonment. *Catena*, 38: 265-278.
15. Laws, J.O. 1941. Measurement of fall velocity of water drops and raindrops. *Trans. Am. Geophys. Union.* 22: 709-721.
16. Le Bissonais, Y., O. Cerdan, V. Lecomte, H. Benkhadra, V. Souchere and P. Martin. 2005. Variability of soil surface characteristics influencing runoff and interrill erosion. *Catena*, 62: 111-124.
17. Loch, R.J. and J.L. Foley. 1994. Measurement of aggregate breakdown under rain: Comparison with tests of water stability and relationship with field measurements of infiltration. *Aust. J. Soil Res.* 32: 701-702.
18. Loch, R.J., 2000. Using rainfall simulation to guide planning and management of rehabilitated areas: Part I. Experimental methods and results from a study at the northparkes mine, Australia. *Land Degrad. Dev.* 11: 221-240.

19. Loch, R.J., R.D. Connolly and M. Littleboy. 2000. Using rainfall simulation to guide planning and management of rehabilitated areas: Part II. Computer simulations using parameters from rainfall simulation. *Land Degrad. Dev.*, 11: 241-255.
20. Meyer, L.D. 1994. Rainfall simulators for soil conservation research. In: Lal, R., (ed.), *Soil Erosion Research Methods*. Soil and Water Conserv. Soc., Ankeny, Iowa. 83-103
21. Meyer, L.D. and W.C. Harmon. 1979. Multiple intensity rainfall simulator for erosion research on row sideslopes. *Trans. ASAE*. 22: 100-103.
22. Misra, R.K. and C.W. Rose. 1995. An examination of the relationship between erodibility parameters and soil strength. *Aust. J. Soil Res.* 33: 715-732.
23. Morgan, R.P.C. 1995. *Soil Erosion and Conservation*. Second Ed., Silsoe College Canfield, Longman. 198p.
24. Niebes, D., S. Schobel, R. Schneider and D. Schroder. 2001. Sprinkling experiments to characterize the influence of land coverage, land use and different soil types on runoff generation. *Geophys. Res. Abstr.* 3.
25. Pla S., I. 2003. Erosion research in Latin America. In: Gabriel, D. and W. Cornelis. (Eds.), *Proceeding of International Symp., 25 Year of Assessment of Erosion*. Ghent, Belgium. pp. 19-27.
26. Poesen, J., F. Ingelmo-Sanchez and H. Mucher. 1990. The hydrological response of soil surface to rainfall as affected by cover and position of rock fragment in the top layer. *Earth Surf. Process. Landforms*. 15: 653-671.
27. Ries, J.B., and M. Langer. 2002. Runoff generation of abandoned fields in the Central Ebro Basin. Results from rainfall simulation experiments. In: Garcia-Ruiz, J.M., J.A.A. Jones, and J. Arnaez Vadillo. (Eds.), *Environmental Change and Water Sustainability*. CSIC. Zaragoza, pp. 65-82.
28. Ries, J.B., M. Langer and C. Rehberg. 2000. Experimental investigations on water and wind erosion on abandoned fields and arable land in the central Ebro Basin, Aragón, Spain. *Geomorphol.*, 121: 91-108.
29. Rouhipour, H., H. Ghadiri and C.W. Rose. 2006. Investigation of the interaction between flow-driven and rainfall-driven erosion processes. *Aust. J. of Soil Res.* 44: 503-514.
30. Roose, E. 2003. Soil erosion research in Africa: A review. In: Gabriel, D. and W. Cornelis. (Eds.), *Proceeding of International Symp., 25 Year of Assessment of Erosion*. Ghent, Belgium. pp. 29-43.
31. Schiettecatte, W., K. Jin, Y. Yao, W.M. Cornelis, J. Lu, H. Wu, K. Verbist, D. Cai, D. Gabriels and R. Hartmann. 2005. Influence of simulated rainfall on physical properties of a conventionally tilled loess soil. *Catena*, 64: 209-221.
32. Seeger, M. and J.B. Ries. 2002. Runoff generation on abandoned fields in the Central Ebro Basin-results from modelling. In: Garcia-Ruiz, J.M., J.A.A. Jones and J. Arnaez. (Eds.), *Environmental Change and Water Sustainability*. CSIC. Zaragoza, pp. 83-97.
33. Sharpley, A. and P. Kleinman. 2003. Effect of rainfall simulator and plot scale on overland flow and phosphorus transport. *J. Environ. Qual.*, 32: 2172-2179.
34. Shelton, C.H., R.D. Von Bernuth and S.P. Rajbhandari. 1985. A continuous- application rainfall simulator. *Trans. ASAE*. 28: 1115-1119.
35. Solomon, K. 1979. Variability of sprinkler coefficient of uniformity test results. *Trans. ASAE*. 22: 1078-1080, 1086.
36. Stroosnijder, L. 2005. Measurement of erosion: is it possible? *Catena* 64: 162-173.
37. Tossell, R.W., G.J. Wall, W.T. Dickinson, R. P. Rudra and P.H. Groenevelt. 1990. The Guelph rainfall simulator II: Part 1 Simulated rainfall characteristics. *Can. Agric. Eng.* 32: 205-213.
38. Veihe, A., J. Rey, J.N. Quinton, P. Strauss, F.M. Sancho and M. Somarriba. 2001. Modelling of event- based soil erosion in Costa Rica, Nicaragua and Mexico: Evaluation of the EUROSEM model. *Catena*. 44: 187-203.
39. Victora, C., A. Kacevas and H. Fiori. 1998. Soil erodibility assessments with simulated rainfall and with the USLE nomograph in soil from Uruguay. *Proceeding of 16<sup>th</sup> World Congress of Soil Science*, Montpellier, France. Paper No. 1041.

## Rainfall and Erosion Simulation Laboratory Soil Conservation and Watershed Management Research Institute: Characteristics, Capabilities and Applications

Majid Mahmoodabadi

Assistant Prof. Department of Soil Sciences, Agriculture Faculty, Shahid Bahonar University of Kerman, 22 Bahman Blvd., Kerman. Iran.

E.mail: mmahmoodabadi@yahoo.com; mahmoodabadai@mail.uk.ac.ir

Mahmood Arabkhedri

Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Department of Soil Conservation.

Email: arabkhedri@gmail.com

### Abstract

Rainfall simulation is frequently employed in soil erosion and related processes studies. A rainfall simulator was constructed in Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI), which is superior to other existing simulators in country. This simulator consists of some parts such as; water supply, rainfall boom, tilting flume, runoff collection and storage system, control keyboard and laboratory. Rainfall boom has 6 nozzles which introduce a distribution of drop sizes from height of 7.75 m. Tilting flume consists of flow generation section, drainage part, slope control facility adjusting to 60%, and runoff collection system. Rain Intensity can be controlled by water pressure, number of active nozzles, their distance and pattern, so different intensities ranges 35 to 125 mm h<sup>-1</sup> are simulated with coefficient of uniformity more than 90%. Depending on rain intensity, mean drops diameter varies from 1.64 to 2.15 mm and terminal velocity ranges 5.70 to 6.78 m s<sup>-1</sup>. Besides, the kinetic energy of falling drops varies from 16.24 to 22.97 J m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>. This simulator can generate rainfall and or runoff separately or simultaneously. So, it is possible to study rain-driven and or flow- driven processes under laboratory conditions.

**Keywords:** Rainfall and runoff simulation, Pressurized nozzle, Tilting flume, Soil erosion.

